

**UNIVERZITA KARLOVA**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie a kartografie



Samo RUSNÁK

## **MODELOVANIE ANEMO-OROGRAFICKÝCH SYSTÉMOV V GIS**

### **ANEMO-OROGRAPHIC SYSTEMS MODELLING IN GIS**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Lukáš Brůha, Ph.D.

Praha 2019

**Vysoká škola:** Univerzita Karlova v Praze  
**Katedra:** Aplikované geoinformatiky a kartografie

**Fakulta:** Přírodovědecká  
**Školní rok:** 2018/2019

# Zadání bakalářské práce

**pro** Sama Rusnáka  
**obor** Geografie a kartografie

**Název tématu:**

Modelování anemo-orografických systémů v GIS

## **Zásady pro vypracování**

Práce provede řešerši problematiky anemo-orografických systémů a souvisejících přístupů k modelování přírodních systémů. Řešitel navrhne geoinformační model odnosu sněhu v důsledku činnosti větru v prostředí anemo-orografických systémů a vytvoří spustitelný softwarový nástroj, v jehož rámci bude navržený model implementován. Funkčnost modelu bude ověřena na vybrané části území KRNAPu s využitím LIDARových dat o vysoké hustotě bodového mračka z této oblasti.

**Rozsah grafických prací:** dle potřeby

**Rozsah průvodní zprávy:** cca. 30 - 50 stran

**Seznam odborné literatury:**

HE, S., OHARA, N. (2017): A New Formula for Estimating the Threshold Wind Speed for Snow Movement. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 7, 9, 2514–2525.

JENÍK, J. (1961): Alpinská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku: teorie anemo-orografických systémů. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.

LYSÁK, J. (2013): Dokumentace k digitálnímu modelu reliéfu a digitálnímu modelu povrchu z oblasti Krkonoš. Univerzita Karlova v Praze, Praha.

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Lukáš Brůha, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 24. 1. 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: květen 2019

.....  
Mgr. Lukáš Brůha, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

.....  
doc. RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.  
Vedoucí katedry

V Praze dne 7. 5. 2019

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 9.5.2019

.....

Samo Rusnák

## **Pod'akovanie**

Na tomto mieste by som sa rád pod'akoval môjmu vedúcemu práce Mgr. Lukášovi Brúhovi, Ph.D. za rady a venovaný čas, ktoré mi poskytol počas tvorby tejto práce a taktiež rodine a priateľom, ktorí ma neustále podporovali pri tvorbe tejto práce.

# **Modelovanie anemo-orografických systémov v GIS**

## *Abstrakt*

Bakalárska práca sa zaoberá možnosťou modelovania anemo-orografických systémov v prostredí GIS. Využíva sa pritom modelácia odnosu snehovej pokrývky vplyvom vetra. Súčasťou práce je vytvorený nástroj, spustiteľný v prostredí ArcGIS, ktorý slúži ako pomôcka pri detekcii anemo-orografických systémov pomocou lokalizácii miest, na ktorých dochádza k akumulácii snehovej pokrývky. Spustiteľný nástroj bol testovaný na území Krkonošského národného parku, za použitia viacerých zdrojov dát opisujúcich model terénu. Dosiahnuté výsledky sú predstavené v závere práce za pomoci mapového výstupu a hodnotenia presnosti.

**Kľúčové slová:** anemo-orografický systém, GIS, priestorové modelovanie

# **Anemo-orographic systems modelling in GIS**

## *Abstract*

The bachelor thesis proposes a model of anemo-orographic systems and implements it in a GIS environment. The key modelling factor is the snow cover shift due to the wind influence. The implemented tool is executable within the ArcGIS environment and as such is a help for localization of anemo-orographic systems, namely of the places, where the accumulation of snow cover occurs. Executable tool was tested in the Krkonoše national park area using multiple data sources describing the terrain model. Achieved results are introduced in the end of the thesis as well as their accuracy and the final map products.

**Keywords:** anemo-orographic system, GIS, spatial modelling

## Obsah

1	Úvod a ciele práce .....	9
2	Anemo-orografický systém .....	10
3	Modelácia vetra .....	12
3.1	Softvérové riešenia modelácie vetru.....	14
4	Odnos snehu vetrom.....	15
5	Dáta .....	18
5.1	Vymedzenie anemo-orografických systémov v Krkonošiach .....	18
5.2	Softvér .....	19
5.2.1	WindNinja .....	19
5.2.2	ArcGIS .....	21
6	Metodika.....	22
6.1	Fyzikálne základy modelu .....	22
6.2	Tvorba modelu v prostredí ArcGIS .....	24
7	Testovanie modelu .....	29
8	Výsledky.....	34
8.1	Krkonoše.....	34
8.2	Mapa Republiky .....	35
9	Diskusia.....	37
10	Záver.....	39
11	Použitá literatúra .....	40
11.1	Použitý softvér .....	42
12	Zoznam príloh .....	43

## Zoznam obrázkov a tabuliek

Obrázok 1: Schéma anemo-orografického systému fungujúceho v štandardnom reliéfe v hrebeňovej oblasti stredohorí pri dominantnom západnom vetre.....	11
Obrázok 2: Relatívna frekvencia pozorovaných hodnôt prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehových častíc pre suchý a mokrý sneh pre 16 meteorologických staníc v západnej Kanade počas rokov 1970-1976. ....	16
Obrázok 3: Rozdiel v hodnotách prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehových častíc pre čerstvý a starý sneh v závislosti od okolitej teploty vzduchu. ....	16
Obrázok 4: Vzťahy medzi množstvom prenášaného snehu a rýchlosťou vetra.. ....	24
Obrázok 5: Diagram princípu hlavného modelu.....	26
Obrázok 6: Nákres modelu WindNinja to Raster.. ....	28
Obrázok 7: Priemerný smer vetra na stanici Šniežka za rok v období september 2010 – marec 2019 [%].....	30
Obrázok 8: Symbolizmus v modeli Crocus pre sneh v snehovej pokrývke ako funkcia viacerých kontinuálnych parametrov. ....	32
Obrázok 9: Vložené hodnoty do modelu „Hlavný model (dáta o snehu z čísla)“ v prostredí ArcGIS na demonštračných testovacích dátach.. ....	33
Obrázok 10: Príklad nastavenia vizualizácie veterného poľa v prostredí ArcGIS na prípade dvojkanálového rastra, ktorý bol výstupom nástroja WindNinja To Raster.....	33
Tabuľka 1: Výber súčasných softvérových riešení modelácii vetru, s primárnym využitím, typom používaného modelu a dostupnosťou.....	14
Tabuľka 2: Vstupné parametre do modelu s dátovými typmi.. ....	25
Tabuľka 3: Priemerný smer vetra na stanici Šniežka za rok v období september 2010 – marec 2019 a normalizácia pre potreby získania priemernej hodnoty. ....	30
Tabuľka 4: Určené modelové hodnoty pre demonštráciu modelu.....	31



# 1 Úvod a ciele práce

Teória anemo-orografických systémov ponúka možnú odpoveď na vysvetlenie viacerých fyzicko-geografických i geobotanických javov. Medzi prvkami, ktoré sú výsledkom činnosti anemo-orografických systémov, možno nájsť viacero javov, od hodnotných pre prírodovedeckú komunitu, v podobe bohatých botanických nálezísk, cez potencionálne nebezpečné javy, v podobe akumulácii snehu a s tým spojené riziká lavín, až po dlhodobé efekty, ktoré môžu viesť k vytváraniu karov, poprípade až ľadovcov.

Tieto systémy však v mnohých pohoriach, hlavne mimo pohoria, na ktorých boli definované, nie sú dôkladne preskúmané. Cieľom je navrhnúť model, ktorý bude modelovať činnosť vetru a následného odnosu snehu v rámci anemo-orografických systémov, ktorá bude vhodnou pomôckou k ich identifikácii. Následne bude cieľom vytvoriť nástroj, ktorý bude daný model implementovať. Popritom sa bude klásť dôraz na to, aby bol nástroj použiteľný aj pre odbornú verejnosť, ktorá nie je zbehlá v prostredí geoinformatických systémov a pre ktorú to bude mať prínos pri ďalších výskumných aktivitách.

K ďalšiemu cieľu tejto práce patrí, že daný model bude otestovaný v prostredí, na ktorom sa dané anemo-orografické systémy nachádzajú a vyhodnotí sa, či a na koľko sú výstupy z modelu vierohodnou pomôckou pri ich určovaní. Pri tomto testovaní budú použité podkladové dáta rôzneho priestorového rozlíšenia, ktoré boli získané viacerými spôsobmi. Podobne bude otestovaný aj vplyv rôznych prístupov k modelácii vetra na výslednú presnosť modelu. Za účelom správnosti fungovania modelu bude vykonaná kvantifikácia dosiahnutých výsledkov a navyše budú vytvorené mapové podklady pre ich vizuálnu interpretáciu.

Posledný cieľ práce je tak trochu nepriamy, ktorý spočíva vo zvýšení povedomia a propagácii teórie anemo-orografických systémov, ktorá je stále len veľmi málo známa ako medzi odbornou, tak aj širokou verejnosťou.

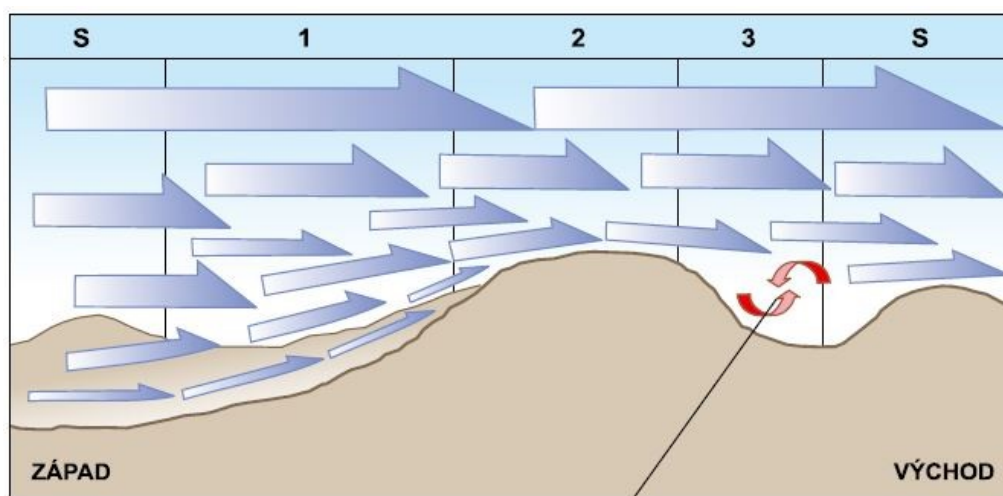
## 2 Anemo-orografický systém

Pojem anemo-orografický systém bol prvý krát definovaný v publikácii *Alpinská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku: teorie anemo-orografických systémů*, ako zoskupenie fyzicko-geografických a geobotanických javov (Jeník 1961). Táto teória vznikla ako reakcia na výskyt viacerých druhov (v publikácii uvedených 145 druhov) cievnatých rastlín, ktoré predstavujú v pohorí Vysokých Sudet, z hľadiska ich prirodzeného fytogeografického rozšírenia, určitú anomáliu. Výskyt daných druhov je dokladovaný na niekoľkých bohatých náleziskách, často v obode krkonošských jám a jesenických kotlín. Ich nápadnou vlastnosťou je to, že v bezprostrednej blízkosti vedľa seba rastú rastliny rozličných fytogeografických a ekologických znakov, ako napríklad druhy arkticko-alpínske, spoločne s subtermofilnými elementami stredoeurópskej nížiny. Pre mnoho druhov rastlín sú tieto lokality ich výškovým maximálnym, alebo minimom stanoviskom rozšírenia na území strednej Európy, a taktiež, pre mnoho druhov rastlín predstavujú dané lokality geograficky izolované územie od hlavného územia rozšírenia.

V prípade, že sa pozrieme podrobnejšie na botanicky bohaté lokality rozšírenia vzácných alpínskych spoločenstiev a vzácných rastlín, nemožno jednoznačne spojiť s faktorom nadmorskej výšky, avšak je možné sledovať susedstvo s niektorými najvyššími vrchmi, hrebeňmi a plošinami Vysokých Sudet (Jeník 1961). Existuje však viacero znakov, ktoré majú tieto lokality spoločné. Patrí medzi nich skutočnosť, že dané botanicky bohaté lokality ležia prevažne na východných okrajoch vrchov, hrebeňov, alebo plošín, pričom okolo najväčších z nich tvoria oblúkovitý vejár. Zároveň sú aj protipólom niektorých mohutných údolí západno-východného smeru a je možné si povšimnúť, že tieto lokality súvisia s miestami, kde v zimných mesiacoch vznikajú mohutné snehové záveje, preveje a lavíny, ktoré sú zároveň aj miestami, kde sa v jarých až letných mesiacoch vyskytujú snehové polia. Vďaka týmto poznatkom Jeník (1961) konštatuje, že dospel k pozoruhodnému spojeniu javov fyzicko-geografických a botanických, pričom sú mnohé tak evidentné, že dávajú nádej na objasnenie ekocentrotických, morfológických, vývojových i chronologických otázok alpínskej oblasti Vysokých Sudet.

Samotný pojem anemo-orografický systém vychádza z názvov najcharakteristickejších znakov tohto systému vo Vysokých Sudetách, ktorou je

usporiadanie reliéfu a jemu prislúchajúci lokálny vietor (Jeník 1961). Každý anemo-orografický systém sa skladá z troch hlavných častí: vodiaceho náveterného údolia, zrýchľujúcej vrcholovej časti a turbulentného záveterného priestoru (pozri obrázok 1). V dôsledku spomínaných lokálnych vetrov dochádza v závetrí svahov k mechanickým turbulenciám, v ktorých sa ukladajú eolické sedimenty, ktoré so sebou unáša vzdušný prúd. V lete sa jedná o minerálny prach, či organický detrit (napr. listy, stielky rastlín a diaspóry). V zime sneh, ktorý sa akumuluje do závejov, často spôsobuje lavíny, ktoré pôsobia rušivo a strhávajú zo skalného podkladu i trsy rastlín. Je preto možné predpokladať, že rušivá činnosť lavín mohla ovplyvniť aj utváranie horského reliéfu a taktiež byť počas pleistocénnych glaciálov zárodkom ľadovcov. Pomocou paleoklimatických údajov je možné tvrdiť, že západné vetry prevládajú v strednej Európe už od pliocénu, preto je možné predpokladať, že v pohorí Vysokých Sudet sú javom, ktorý pretrváva už niekoľko miliónov rokov, čím je možné uvažovať o anemo-orografických systémoch ako o významnom činiteli pri tvorbe fyzicko-geografických a vegetačných pomerov.



Obrázok 1: Schéma anemo-orografického systému fungujúceho v štandardnom reliéfe (S) v hrebeňovej oblasti stredohorí pri dominantnom západnom vetre. Jednotlivé časti: vodiace náveterné údolie (1), zrýchľujúca vrcholová časť (2) a turbulentný záveterný priestor (3). Modré šípky poukazujú na prevahu laminárneho prúdenia, červené ukazujú závetrie s turbulentným prúdením. Zdroj: Jeník 2008

Neskôr, po definovaní anemo-orografických systémov na príklade pohorí Vysokých Sudet, boli tieto systémy opísané aj v ďalších českých, alebo aj európskych pohoriach, medzi ktoré patria napríklad Brdy (Hlaváček, Sofron 2007), Koralpe a Nízke Taury vo východných Alpách, pohorí Ben Lawers v Škótsku, Abisku v Škandinávii, White Mountains v Apalačských horách (Jeník 2008), pohorí Vogéz, v regióne Feldberg v Čiernom lese (Jeník 1998) a v pohorí Vitoša v Bulharsku (Blažková 1983).

### 3 Modelácia vetra

V súčasnosti je najčastejším uplatnením modelácie prúdenia vetra jeho využitie v energetickom priemysle, najmä pri hľadaní optimálnych pozícií pre veterné turbíny. Princípy, na ktorom pracujú priestorové modely prúdenia vetra možno klasifikovať do štyroch kategórií; koncepčné, experimentálne, štatistické a numerické modely (NYSERDA 2010).

Koncepčné modely pozostávajú z teórie, ktoré popisujú ako reaguje vietor vzhľadom na terén a sú založené na kombinácii priameho pozorovania a teoretických znalostí meteorológie (NYSERDA 2010).

Experimentálne modely predstavujú prevažne fyzické modely v mierke k simulovanému územiu, na ktorom prebiehajú testy v aerodynamickom tunely (NYSERDA 2010). Tieto modely sa využívajú napríklad pri modelovaní prúdenia vetra v komplexnom, alebo urbánnom prostredí, pričom sa môžu sledovať javy šírené vetrom, ako bolo predvedené pri sledovaní potencionálneho úniku plynov z teplárne v meste Liberec (Michálek, Zacho 2016).

Štatistické modely pracujú prevažne s údajmi získanými priamym meraním na modelovanom území, ako napríklad výška, sklon, expozícia a drsnosť povrchu, pričom hľadajú taký indikátor, ktorý vykazuje najvyššiu mieru korelácie k pozorovanej rýchlosti vetru (NYSERDA 2010). Medzi ich výhodu patrí, že sú jednoduché a transparentné, odlišne od numerických modelov, ktoré často pôsobia viac ako „čierne skrinky“.

V súčasnosti najpopulárnejšia metóda modelácie prúdenia vetra pre veterný priemysel sú numerické modely (NYSERDA 2010). Rozlišujú sa pri tom štyri hlavné kategórie; modely zachovávajúce hmotu, Jackson-Huntov model, CFD a NWP model.

Modely zachovávajúce hmotu pracujú na základe nasledovného princípu; model uvažuje nad tým, že vzduch v atmosfére je nestlačiteľný, vďaka čomu na základe princípu zachovania hmoty, musí vietor pri terénnych prekážkach (vyššom teréne) zrýchľovať, aby mohlo cez dané územie prejsť rovnaké množstvo vzduchu (NYSERDA 2010). Vďaka tomu tieto modely predpovedajú silnejšie vetry na hrebeňoch pohorí a slabšie v údoliach a zo svojej podstaty nedokážu premietnuť do svojich výstupov fenomény spôsobené rozdielnymi teplotami, ako napríklad morský vánok, alebo horské vetry v údoliach.

Jackson-Huntove modely sú založené na teórii, ktorá bola vyvinutá na analýzu zmeny v rýchlosti vetra a šmykového napätia v závislosti na veľkosti a tvaru kopca a drsnosti povrchu (Jackson, Hunt 1975). Ich vývoj nastal pôvodne v 80tych a 90tych rokoch 20. storočia, pričom v súčasnosti existuje viacero softvérových riešení, ktoré pracujú na základe tejto teórie, medzi nimi aj WAsP, ktorý je v súčasnosti najpoužívanejším modelom prúdenia vetra v energetickom priemysle (NYSERDA 2010).

CFD, alebo *Computational fluid dynamics*, je pojem, ktorý je používaný pre široké spektrum numerických metód určených pre riešenie komplexných trojdimenzionálnych problémov v čase (Rapp 2017). Toto odvetvie vzišlo z prístupov k riešeniu Navier-Stokovej rovnice, pričom riešenie tejto rovnice zostáva do dnešných dní medzi najnáročnejšie problémy fyziky. V oblasti modelácie prúdenia vetra sú schopné simulovať nelineárne efekty na vietor, ako napríklad separácia prietoku v strmom teréne (NYSERDA 2010).

*Mesoscale Numeric Weather Prediction* (NWP) sú modely, ktoré boli primárne vyvinuté pre použitie v meteorologických modeloch (NYSERDA 2010). Podobne ako CFD modely, tiešia Navier-Stokovú rovnicu, pričom v sebe zahŕňajú aj parametrizačné schémy pre slnečnú a infračervenú radiáciu, mikrofyziku oblakov, pôdny model a iné. Pre svoj beh potrebujú obrovské množstvo výpočtového výkonu a typicky rozlíšenie modelu je v rádoch kilometrov, vďaka čomu nie sú schopné dosiahnuť dostatočnej presnosti pre komplexný terén.

### 3.1 Softvérové riešenia modelácie vetru

V súčasnosti existuje mnoho softvérových riešení možností modelácie vetra, líšiacich sa primárnym použitím, typu používaného modelu pre modeláciu vetra, ako aj možnosťami využitia. Patria medzi nich nasledovné softvéry: MS-Micro/3 (Zephyr North Ltd. 2019), RT Windmap (Meteodyn 2019a), TopoWind (Meteodyn 2019b), UrbaWIND (Meteodyn 2019c), WAsP (DTU Wind Energy 2019), WindNinja (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2019a) a WindSim (WindSim 2019). Ich prehľad je možno pozrieť v tabuľke 1.

Názov	Primárne využitie	Typ modelu	Dostupnosť
MS-Micro/3	Energetický priemysel Veterné charakteristiky	Jackson-Hunt	Spoplatnený
RT Windmap	Modelácia vetru v reálnom čase Dopravná infraštruktúra	CFD	Spoplatnený, možnosť trial verzie
TopoWind	Veterné charakteristiky	CFD	Spoplatnený, možnosť trial verzie
UrbaWIND	Urbánne prostredie	CFD	Spoplatnený, možnosť trial verzie
WAsP	Energetický priemysel	Jackson-Hunt, CFD	Spoplatnený, možnosť trial verzie
WindNinja	Šírenie požiarov	Zachovávajúci hmotu, CFD	Zdarma
WindSim	Energetický priemysel	CFD	Spoplatnený

Tabuľka 1: Výber súčasných softvérových riešení modelácii vetru, s primárnym využitím, typom používaného modelu a dostupnosťou. Zdroj: DTU Wind Energy 2019; Meteodyn 2019a; 2019b; 2019c; NYSEDA 2010; RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2019a; WindSim 2019; Zephyr North Ltd. 2019, vlastné spracovanie.

## 4 Odnos snehu vetrom

Pri modelácii odnosu snehu vetrom možno nájsť v literatúre viacero rôznych postupov a spôsobom, akým dosiahnuť požadovaný výsledok, od jednoduchších postupov, až po zložité modely.

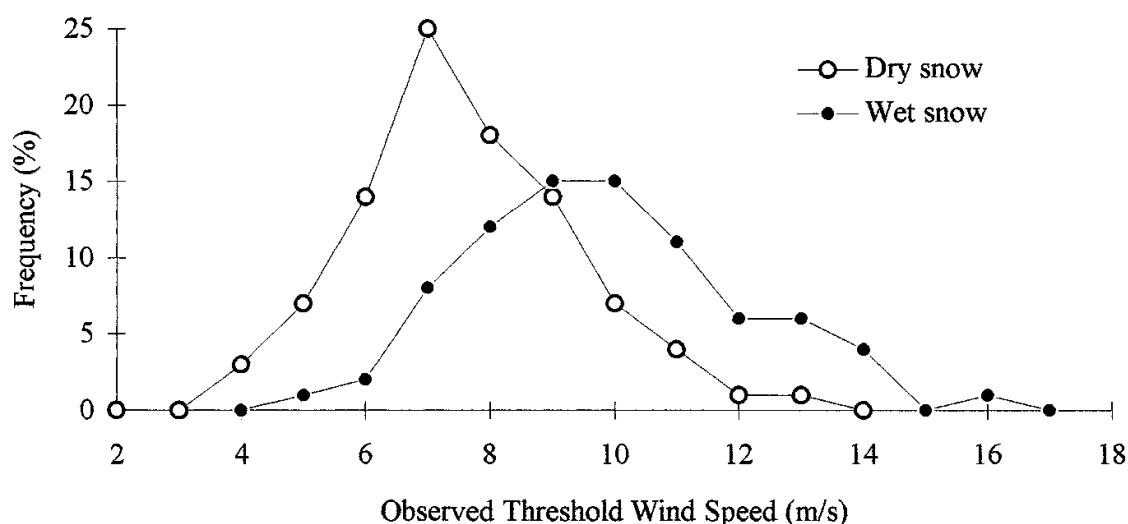
Počas snehových zrážok v horskom teréne má vietor očividný efekt na pohyb snehových častíc, ktorý končí ich nerovnomernou distribúciou, kedy sa snehové častice ľahšie akumulujú na náveternom svahu, ako na záveternom svahu (Wang, Huang 2017).

Redistribúcia snehu vetrom zásadne ovplyvňuje zimnú mikroklimu, akumulácie snehovej pokrývky a následný odtok pri jej topení v chladných regiónoch vystavených vetru (Pomeroy, Gray 1990). Vo vysokohorskom teréne je vietor považovaný za jeden z dominantných činiteľov, ktorý kontroluje distribúciu a akumuláciu snehu (Winstral, Elder, Davis 2002), dokonca je pravdepodobné, že môže byť jedným z kľúčových mechanizmov pri tvorbe ľadovcov, ako predstavila štúdia v čílskych Suchých Andách (Gascoin et al. 2013). Po novom snehu, je odvievaný sneh vetrom najaktívnejším činiteľom, ktorý sa v horských oblastiach podieľa na akumulácii snehu, ktoré značne zvyšujú hrozbu lavín (Schweizer, Jamieson, Schneebeli 2003), čo z neho robí jeden z hlavných faktorov pri ich predpovedaní, avšak nie vždy je možné tento prvok vierohodne modelovať, vzhľadom na to, že väčšina predpovedných metód sa zakladá len na empirických pravidlách a skúsenostiach (Guyomarc'h, Mérindol 1998).

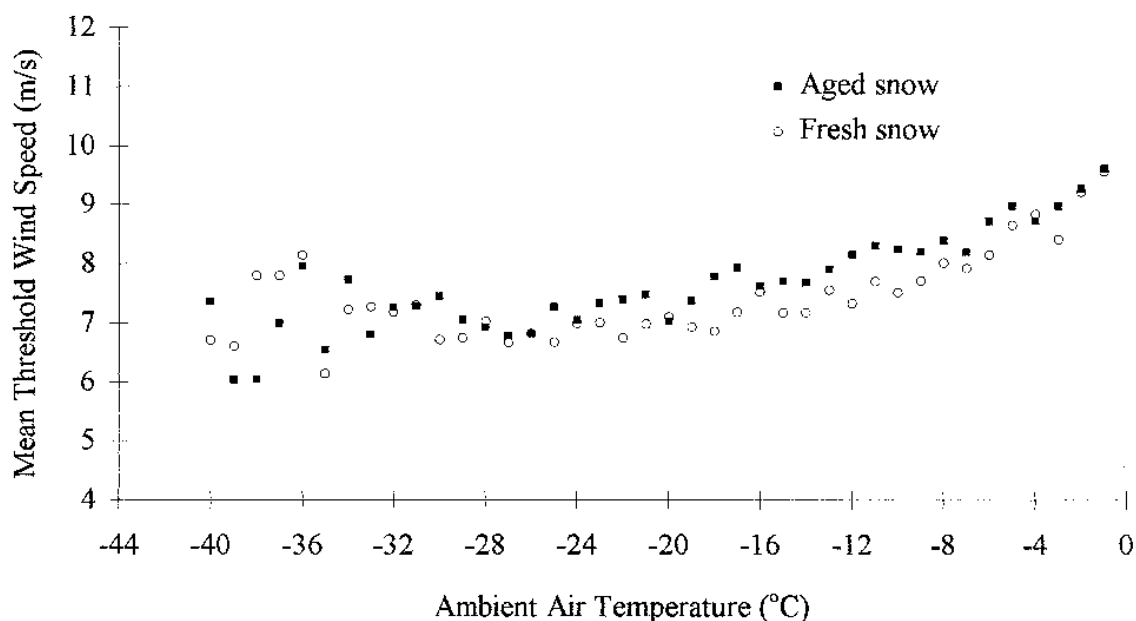
Prahová rýchlosť vetra pre odnos snehových častíc je jeden z najdôležitejších parametrov pre opis snehu pomocou vetra (He, Ohara 2017). Sneh sa začne pohybovať vplyvom vetra v momente, kedy rýchlosť vetra dosiahne prahovú hodnotu, ktorá je závislá od typu snehu (Guyomarc'h, Mérindol 1998). Na jej správne určenie je potrebné vziať do úvahy závislosť od teploty vzduchu, času od uloženia snehu do snehovej pokrývky a na vzájomnej súdržnosti snehových častíc (Guyomarc'h et al. 1994).

Samotné konkrétne hodnoty zistenej prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehu sú naprieč štúdiami z rôznych oblastí odlišné. Štúdia z oblasti Davos vo Švajčiarsku uvádza ako hodnotu prahovej rýchlosti snehu rozmedzie  $4 - 5 \text{ m s}^{-1}$ , pričom je táto hodnota závislá od hustoty najvrchnejšej vrstvy snehovej pokrývky a od turbulentného prúdenia vzduchu pri povrchu (Meister 1989). Obsiahlejšia štúdia, ktorá pracovala s pozorovaniami z 16 meteorologických staníc v západnej Kanade v rokoch 1970 – 1976, určila ako priemernú hodnotu prahovej rýchlosti pre odnos mokrého snehu  $9,9 \text{ m s}^{-1}$ ,

pričom rozmedzie hodnôt dosahuje 7 – 14 m s<sup>-1</sup> (jednotlivú frekvenciu podľa rýchlosti vetra možno vidieť na obrázku 2) a pre suchý sneh 7,7 m s<sup>-1</sup>, pričom rozmedzie hodnôt dosahuje 4 – 11 m s<sup>-1</sup> (Li, Pomeroy 1997). Taktiež daná štúdia poukazuje na rozdiely v hodnotách prahových rýchlostí vetru pre odnos čerstvého snehu, ktorý dosahuje priemernú hodnotu 7,5 m s<sup>-1</sup> a starého snehu, pri ktorom dosahuje priemernú hodnotu 8 m s<sup>-1</sup> (jednotlivé priemery podľa teploty vzduchu možno vidieť na obrázku 3).



Obrázok 2: Relatívna frekvencia pozorovaných hodnôt prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehových častíc pre suchý (biele kruhy) a mokrý sneh (čierné kruhy) pre 16 meteorologických staníc v západnej Kanade počas rokov 1970-1976. Zdroj: Li, Pomeroy 1997.



Obrázok 3: Rozdiel v hodnotách prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehových častíc pre čerstvý (biele kruhy) a starý (čierné kruhy) sneh v závislosti od okolitej teploty vzduchu. Zdroj: Li, Pomeroy 1997.



Vzorce pre výpočet hodnoty prahovej rýchlosti vetra pre odnos snehu používajú ako vstupné parametre rozličné veličiny, či už ide o vstupnú veličinu vo forme teplotu vzduchu vo výške 2 metre (Li, Pomeroy 1997), fyzikálne vlastnosti snehovej pokrývky, medzi ktoré patrí veľkosť, dendricita a sféricita (Guyomarc'h, Mérindol 1998), alebo od kombinácie teploty, veľkosti snehovej častice a času uloženia (He, Ohara 2017).

Sneh sa pomocou vetra redistribuuje primárne pomocou saltácie a suspenzie (Pomeroy, Male 1992). Saltácia je dominantným spôsobom redistribúcie v úzkej vrstve atmosféry pri povrchu, zatiaľ čo suspenzia dominuje nad touto vrstvou. Redistribúcia snehu pomocou saltácie prebieha vďaka odrážaniu sa častíc od povrchu, pričom sledujú zakrivené trajektórie pozdĺž povrchu (Pomeroy, Male 1987). Redistribúcia snehu pomocou suspenzie prebieha vtedy, pokiaľ je častica podporovaná vertikálnym komponentom atmosférickej turbulencie. Dokiaľ rýchlosť častíc dosahuje hodnoty nad koncovú rýchlosť pádu, stále sa udržia vo vzduchu.

Pre výpočet množstva odneseného snehu existuje viacero prístupov, ako sa pristupuje k jeho zisteniu. Gauer (2001) vytvoril model, ktorý popisuje pomocou rovníc opisuje posun snehu v komplexnom vysokohorskom teréne, ktorý popisuje pohyb v suspenzii i saltácii. Ďalšia štúdia pomocou vlastného terénneho prieskumu, pri ktorom sledovala množstvo odneseného snehu za pomoci snehových plotov a 15 prípadových štúdií od ďalších autorov, vytvorila vzťahy pre závislosť odnosu snehu na rýchlosti vetra (Sturm, Stuefer 2013).

V súčasnej dobe existujú modely, ktoré simulujú stav snehovej pokrývky. Patrí medzi nich model SNOWPACK, využívaný v rámci modelu Alpine3D, ktorý simuluje vývoj snehovej pokrývky počas zimy na základe meteorologických údajov (WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF 2019) a model Crocus, ktorý slúži primárne na modelovanie metamorfizmu snehu (Centre National de Recherches Météorologiques 2014).

## 5 Dáta

Pri demonštrácii práce modelu sú použité Lidarové dáta o rozlíšení 1 meter vytvorené pre územie Krkonošského národného parku (Lysák 2013). Taktiež sú použité aj dáta z verejne dostupného európskeho digitálneho modelu povrchu o rozlíšení 25 metrov (Copernicus Programme 2016).

Medzi vstupné meteorologické dáta, ktoré sú použité v rámci tejto práce, patria dáta o priemernom smere a rýchlosti vetra získané zo stanice Šniežka za obdobie od septembra 2010 do marca 2019 (Windfinder 2019).

### 5.1 Vymedzenie anemo-orografických systémov v Krkonošiach

V Krkonošiach sa nachádzajú tri významné anemo-orografické systémy; západokrkonoský, východokrkonoský a rýchorský (Jeník 1961). Západokrkonoský má dlhé vodiace náveterné údolie toku Mumlavy, ktoré pozvoľna stúpa k vrcholovej plošine Navorskej, Pančickej a Labskej boudy. Medzi záveterné turbulentné priestory tohto systému patrí Mały a Wielky Śnieżny Kocioł na poľskej strane Krkonoš a Labská jáma na českej strane. Východokrkonoský má vodiace náveterné údolie v toku Bíleho Labe, ktoré v jeho závere stúpa na vrcholové plató, zložené z komplexu Bíle louky, Čertovy louky a Pláně pod Sněžkou. Záveterné turbulentné priestory tvoria po jej východnom okraji rozsiahly vejár (ktorý je najnápadnejším znakom výskytu anemo-orografického systému), ktorý sa rozprestiera od lokality Modrý důl až po Kocioł Wielkiego Stawu na poľskej strane Krkonoš. Posledným opísaným anemo-orografickým systémom v Krkonošiach je rýchorský, ktorého vodiace údolie vedie údolím toku Úpa, až k obci Horní Maršov, kde vietor stúpa smerom k vrcholu Kutná. Vzhľadom k nízkej nadmorskej výške vrcholovej časti, ktorá dosahuje len okolo 1000 metrov, a malému plošnému rozsahu vrcholovej časti sa v záveterných turbulentných priestoroch nevytvoril kar, ani karoid, avšak mnohé záveterné svahy nesú znaky záveterných turbulentných priestorov.

## 5.2 Softvér

Použitý softvér v tejto práci pozostáva zo softvéru *WindNinja-3.5.2.*, ktorý slúži na simuláciu veterného poľa a softvéru ArcGIS s jeho funkciami obsiahnutými v rámci *ModelBuilderu*.

### 5.2.1 WindNinja

WindNinja je open-source softvér, ktorý vypočítava priestorové veterné polia, primárne pre potreby zistenia šírenia požiarov v prírode a iné aplikácie, pre ktoré je potrebné predpovedať správanie vetra v komplexnom teréne vo vysokom rozlíšení (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2019a). Bol vyvinutý na použitie v prípadoch pohotovosti, takže ponúka krátky čas simulácie, nízke požiadavky na procesor a nízke požiadavky na odbornosť používateľa. Program je využívaný viacerými univerzitami, národnými parkmi, agentúrami a softvérm, umožňujúcimi simuláciu lesných požiarov (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2019b).

Softvér WindNinja možno spustiť s dvoma rôznymi modelmi; modelom *Conservation of Mass* (model zachovávajúci hmotu) a modelom *Conservation of Mass and Momentum*, ktorý pracuje vďaka CFD modelu OpenFOAM (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018a). Rozdiel medzi týmito dvoma metódami je v rýchlosti simulácie, kedy model zachovávajúci hmotu vyžaduje menej ako minútu na jej dokončenie, rozdielne od jeho náprotivku, ktorý vyžaduje 10 – 30 minút. Avšak, model zachovávajúci hmotu vykazuje počas situácii, kedy dochádza k silnému vetru, menšiu presnosť na záveterných svahoch, kde dochádza k spätným prúdeniam.

Ako vstup do programu je potrebný súbor, obsahujúci výškové údaje modelovaného územia (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018a). Toto môže byť dosiahnuté pomocou súborov nasledovných typov:

- ASCII Raster (.asc)
- FARSITE landscape file (.lcp)
- GeoTiff (.tif)
- EDAS IMAGINE (.img)

Vstupné dáta musia obsahovať informácie o projekcii, všetky jednotky vo vrstve (výšky a rozlíšenie bunky) musia byť v metroch, nemôže obsahovať miesta s hodnotami

*NODATA* a rozsah by mali mať menší ako 50 kilometrov na výšku aj šírku. Pri vstupe *FARSITE landscape file* nie je potrebné zadávať informácie o vegetácii, keďže daný súbor ich už obsahuje, v iných prípadoch je však možné si zvoliť len typ prevládajúcej vegetácie (tráva, kríky a stromy).

Informácie o vetre sa môžu zadávať priamo, pomocou určenia priemernej rýchlosti vetru a smeru za modelované územie (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018a), pomocou bodovej inicializácie, z viacerých miest v rámci modelovaného územia (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018c), alebo z meteorologického modelu, podľa výberu používateľa z viacerých ponúkaných, kedy softvér potrebné dáta stiahne pomocou internetu (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018d).

Softvér ponúka aj možnosť pridať do simulácie efekty horského vetra a stability zvrstvenia atmosféry (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018b). Pre to, aby bolo možné tieto prvky simulovať, je potrebné k dátam o vetre pridať ešte informácie o čase, dátume, oblačnosti a teploty na modelovanom území (resp. na jednotlivých staniciach pri bodovej inicializácii). V prípade využívania dát z meteorologických modelov budú tieto dáta automaticky prevzaté.

Výstup zo softvéru je možný vo viacerých rôznych výstupných formátoch, pričom je možné pri výstupe zvoliť viacero rôznych možností (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018a). Zvoliť si je možné medzi nasledovnými výstupmi:

- *Google Earth Files* (.kmz), zobrazujúci smer a rýchlosť vetra.
- *Fire Behavior Files* (.asc), umožňujúce simuláciu správania požiarov v špecializovaných softvéroch.
- *Shape Files* (.shp), vo forme bodovej vrstvy s rovnakou projekciou akú má vstupná vrstva s výškovými údajmi.
- *Geospatial PDF Files* (.pdf).
- *VTK Files* (.vtk), ktoré umožňujú prezerať výstupné veterné pole v 3D zobrazení.

Všetky vstupy do programu je možné zadávať pomocou grafického používateľského rozhrania, rovnako ako aj pomocou príkazového riadku (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018a).

### 5.2.2 ArcGIS

Prostredie ArcGIS ponúka možnosť, ako dosiahnuť vytvorenie, úpravu a manažovanie vlastného modelu, ktorý je možné následne ďalej zdieľať s inými používateľmi, ktorí ich môžu využívať, a to pomocou nástroja v podobe *ModelBuilderu* (ESRI 2019b). Model pracuje na princípe spájania jednotlivých geoprocessingových nástrojov do sekvencie. Za výhodou pri modeloch považujem, že aj menej zdatný používateľ môže vykonávať zložité úlohy, bez toho, aby musel do podrobností poznať prostredie geoinformačných systémov, pričom postačí, pokiaľ bude vytvorený model prispôbený požiadavkam používateľa.

Jednou z vlastností, ktorá je zaujímavá v prostredí *ModelBuilder* je možnosť iterácii (ESRI 2019a). Vďaka tomu je umožnené niekoľkokrát opakovať proces, s istou mierou automatizácie, ktorá môže pomôcť znižovaniu času a úsilia potrebného na vykonanie úlohy. V prostredí *ModelBuilder* môže byť každý proces opakovaný vďaka iterácii vykonaný s inými dátami, alebo vstupnými nastaveniami. Každý model môže obsahovať len jeden iterátor, avšak v prípade používania submodelov ich možno použiť aj viacero, poprípade je možné vykonať iteráciu len na určitej časti geoprocessingových nástrojov.

## 6 Metodika

Pre modelovanie anemo-orografických systémov v prostredí GIS je potrebné vybrať charakteristiku, ktorá určí čo najjednoduchšie ich prítomnosť. V tomto ohľade bude na ich reprezentáciu použité správanie sa snehu, keďže nám dostatočne poukazuje na turbulentné záveterné priestory anemo-orografických systémov. Tieto priestory sú zároveň aj najvýznamnejším miestom anemo-orografických systémov, vzhľadom na skutočnosť, že na daných miestach sa nachádzajú potencinálne významné botanické náleziská. To by zároveň mohlo slúžiť, v prípade botanických výskumov, na vytipovanie si potencinálne bohatých botanických lokalít, napríklad v doteraz málo preskúmaných pohoriach. Taktiež bude možné porovnať modelové hodnoty s jasnými leteckými, poprípade družicovými snímkami, na ktorých je možné pozorovať snehové polia.

Na modeláciu sa správania snehu v anemo-orografickom systéme je potrebné zistiť správanie sa vetra v danom systéme a následne, na základe fyzikálnych vlastností snehu, vymedziť miesta, kde dochádza k jeho úbytku a miesta, kde dochádza opačne k ukladaniu snehu do snehovej pokrývky.

### 6.1 Fyzikálne základy modelu

Pre samotný model v prostredí GIS, ktorý bol vytvorený ako súčasť tejto práce, bude jeho systém pracovať na základe nasledovných rovníc, získaných z literatúry.

V prvej fáze sa z údajov o vetre a snehových vlastnostiach sa určia miesta (body), kde bude dochádzať k odnosu snehu. To sa docieli, v prvej fáze výpočtu, pomocou *driftability indexu* ( $Di$ ), ktorý určuje index schopnosti snehu pohybovať sa (Guyomarc'h, Mérindol 1998). Zisťuje sa pomocou dvoch vzťahov; pre čerstvú snehovú pokrývku, alebo pre premenenú snehovú pokrývku. Pri posúdení je pritom podstatná hodnota dendricity ( $d$ ) snehu, pokiaľ je hodnota nenulová, jedná sa v tomto prípade o čerstvú pokrývku a použije sa nasledovný vzťah na výpočet *driftability indexu* ( $Di$ ), spoločne s parametrom sféricity ( $s$ ) snehu:

$$Di = 0,75d - 0,5s + 0,5$$

V prípade, že je hodnota dendricity u snehu nulová, použije sa nasledovný vzťah pre premenenú snehovú pokrývku, za použitia veľkosti snehových zŕn ( $gs$ ) [mm] a sféricity ( $s$ ) snehu:

$$Di = 0,583gs - 0,833s + 0,833$$

V druhej fáze výpočtu sa bude za pomoci vyššie zisteného *driftability indexu* ( $Di$ ) a rýchlosti vetra ( $w$ ) [ $m\ s^{-1}$ ] zisťovať *snow-driftability index* ( $SDi$ ), ktorý v prípade jeho pozitívnej hodnoty signalizuje, že dochádza k odvíaniu snehu. Jeho výpočet možno sledovať na nasledovnom vzťahu:

$$SDi = -2,868(\exp(-0,085w)) + 1 + Di$$

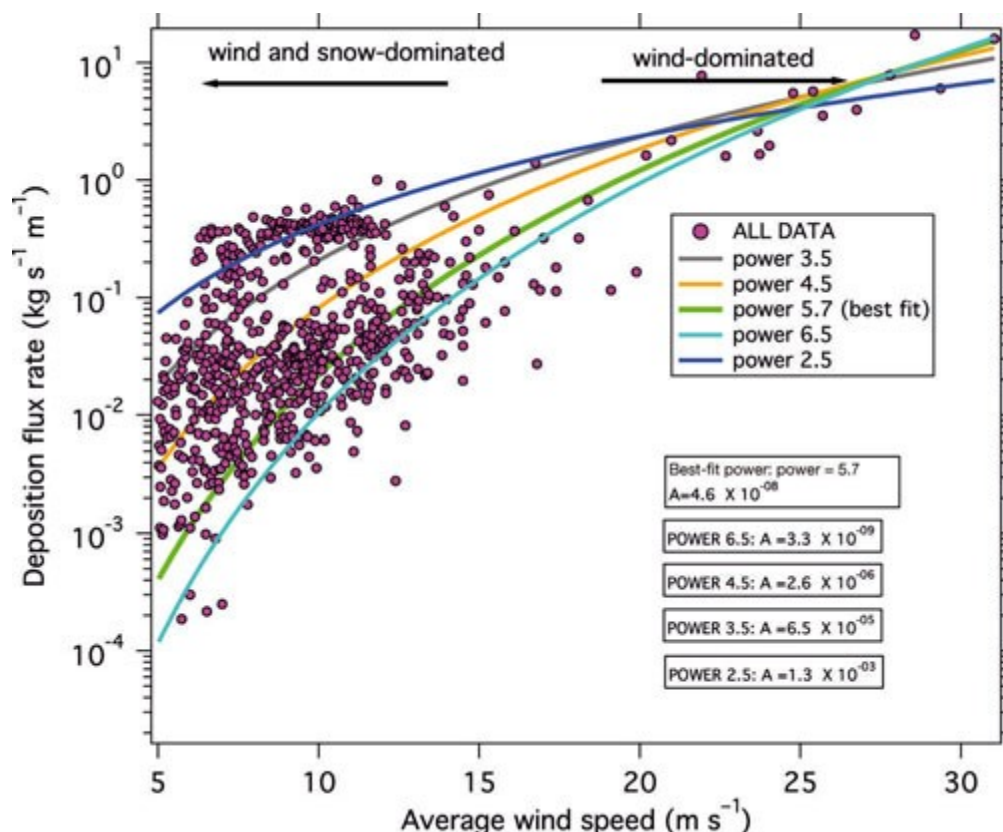
Ďalším krokom bude zistenie množstva odviateho snehu, jeho premiestnenie a následné uloženie. Množstvo odviateho snehu bude zistené pomocou matematického vzťahu, ktorý pracuje s rýchlosťou vetru. Na základe terénnych meraní viacerých vedeckých skupín sa určili matematické vzťahy, ktoré určujú na základe rýchlosti vetra množstvo premiestneného snehu [ $kg\ s^{-1}\ m^{-1}$ ] (pozri obrázok 4) (Sturm, Stuefer 2013). Na základe odporúčaní v tejto štúdii budú použité dva vzťahy pre výpočet odneseného snehu, ako rozmedzie, v ktorom sa môže daná hodnota nachádzať, keďže nebolo možné nájsť jeden vzťah, ktorý by opisoval závislosť medzi rýchlosťou vetra a odneseným snehom dostatočne. Pre výpočet spodného rámca množstva odneseného snehu ( $Q_L$ ) sa použije nasledovný vzťah:

$$Q_L = 3,3 * 10^{-9}w^{6,5}$$

Pre výpočet vrchného rámca množstva odneseného snehu ( $Q_U$ ) sa použije nasledovný vzťah:

$$Q_U = 1,3 * 10^{-3}w^{2,5}$$

Toto množstvo odneseného snehu bude následne podľa smeru vetra presunuté podľa používateľom zadanej vzdialenosti.



Obrázok 4: Vzťahy medzi množstvom prenášaného snehu a rýchlosťou vetra. Na ose x je vykreslená rýchlosť vetra [ $\text{m s}^{-1}$ ], na ose y rýchlosť prenášania snehu [ $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ], body predstavujú jednotlivé hodnoty namerané počas 16 prípadových štúdií, ktoré sledovali pomocou rôznych pozorovacích metód množstvo preneseného snehu vzhľadom na rýchlosť vetra. Jednotlivé farebné línie reprezentujú vzťahy, ktoré štúdiá posudzovala, ako funkcie rýchlosti vetru vzhľadom na množstvo prenášaného snehu. Zdroj: Sturm, Stuefer 2013.

## 6.2 Tvorba modelu v prostredí ArcGIS

Pri tvorbe modelu v prostredí ArcGIS je potrebné dbať na skutočnosť, že model je určený predovšetkým pre odbornú verejnosť, ktorá však nemá dostatočné skúsenosti s geoinformatickými systémami. Je preto vhodné, aby vstupné parametre a ďalšie nastavenia v modeli boli možno čo najviac prispôbené tomuto faktu. Z tohto dôvodu som sa rozhodol, že niektoré položky budú už predom dané a spoločne s *toolboxom* budú tvoriť kompaktný celok, čím dôjde k zjednodušeniu práce s daným modelom pre užívateľa. Podstatná je pri ňom štruktúra priečinkov, s ktorými je model spätý, pri ktorom sa výsledné rastre ukladajú, podľa ich obsahu, do príslušného priečinka v rámci priečinku *Raster*. Rovnako pre zjednodušenie, je k modelu pripojená aj geodatabáza *Modelacia\_A-O.gdb*, ktorá slúži pre model ako pracovné prostredie a zároveň slúži aj na ukladanie výsledných bodových vrstiev veterného poľa, prípadne rastrov vytvorených z číselných hodnôt.



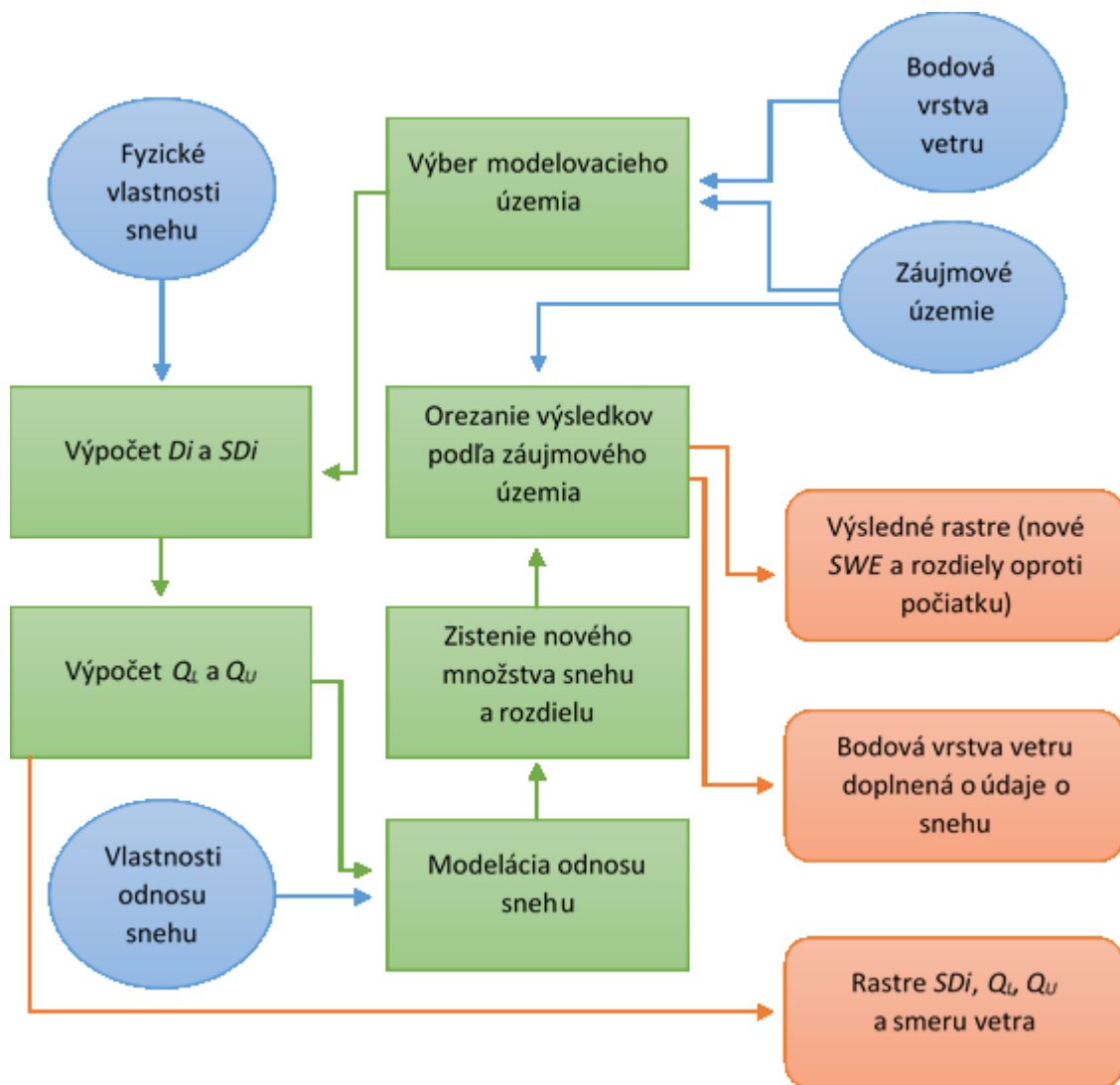
Cieľom práce modelu je zistenie miest, ktoré prislúchajú k anemo-orografickým systémom a to za pomoci nájdenia oblastí s pozitívnou bilanciou snehovej pokrývky po jej redistribúcii pomocou vetru. Na základe tohto princípu si môžeme určiť, aké bude používať model pre svoje fungovanie vstupné údaje (pozri tabuľku 2). Hlavným podkladom pre prácu modelu budú dáta o smere a rýchlosti vetra vytvorené v softvérovom prostredí WindNinja, ktoré sú dostupné vo forme vrstvy bodových objektov vo formáte .shp. Ďalšiu podkladovú vrstvu pre beh modelu budú tvoriť údaje o vlastnostiach snehovej pokrývky. Keďže ide o plošný znak, bude vhodné pre tieto účely použiť rastrové dáta, poprípadne, hlavne pri menších záujmových územiach, alebo v prípade všeobecného modelovania, aj číselný vstup. Ďalej bude potrebné na vstupe do modelu určiť záujmové územie, na ktorom bude prebiehať modelácia. Pre tento účel, bude vhodná akákoľvek vrstva, avšak preferovaná je možnosť uceleného polygónu. Posledné hodnoty, ktoré je do modelu zadať sú preferovaná vzdialenosť odnosu snehu počas behu modelu, na ktorom vstupe bude celočíselné číslo.

Názov vstupného parametru	Dátový typ parametru	
	Model so vstupnými dátami o snehu z rastu (príloha 1)	Model so vstupnými dátami o snehu z čísla (príloha 3)
Veterné pole	Composite Geodataset	Composite Geodataset
Záujmové územie	Feature Layer	Feature Layer
Dendricita (Dendricity)	Raster Layer	Double
Sféricita (Sphericity)	Raster Layer	Double
Vodná hodnota snehu (SWE) [mm]	Raster Layer	Double
Veľkosť snehových zrn [mm]	Raster Layer	Double
Predpona pre ukladanie rastrov do geodatabázy	-	Any value
Rozlíšenie modelu [m]	Analysis Cell Size	Analysis Cell Size
Vzdialenosť odnosu snehu [m]	Long	Long
Dĺžka jedného opakovania modelu posunu snehu [m]	Double	Double

Tabuľka 2: Vstupné parametre do modelu s dátovými typmi. Zdroj: vlastné spracovanie.

Potrebné je si ďalej určiť, ako bude model fungovať ako celok a ako budú za sebou postupovať jednotlivé procesy a aké z neho budú výstupy. To je možné vidieť názorne na obrázku 5. Model v prvej fáze určí modelovacie územie, kedy pomocou funkcie *Clip* oreže vstupnú bodovú vrstvu podľa záujmového územia, spoločne s potrebnou

nárazníkovou zónou pre správny chod modelu, ktorá sa rovná dĺžke požadovanej vzdialenosti odnosu snehu v metroch. Toto zabezpečí, aby bolo fungovanie modelu pre záujmové územie správne a zároveň, aby model zbytočne nevykonával operácie na území, ktoré sa nepremietne do výsledkov.



Obrázok 5: Diagram princípu hlavného modelu. Modré prvky značia vstupy do modelu, zelené spracovanie v rámci modelu a červené výstupy z modelu. Zdroj: vlastné spracovanie.

V ďalšej fáze, model pridá k bodovej vrstve snehu fyzické vlastnosti snehovej pokrývky (dendricita, sféricita, veľkosť snehových zín a vodná hodnota snehovej pokrývky) z rastrovej reprezentácie pomocou funkcie *Extract Multi Values to Points* a následne, na ich základe, vypočíta pomocou funkcií balíka *Data Managment* pre každý bod hodnoty  $D_i$  a následne aj  $S_{di}$ . Ďalej model vypočíta pre tie body, pre ktoré je hodnota  $S_{di}$  kladná, hodnoty  $Q_L$  a  $Q_U$ , ktoré následne spoločne s hodnotami smeru vetra a  $S_{di}$  pridá do rastrovej reprezentácie vo formáte .tif na výstupe.

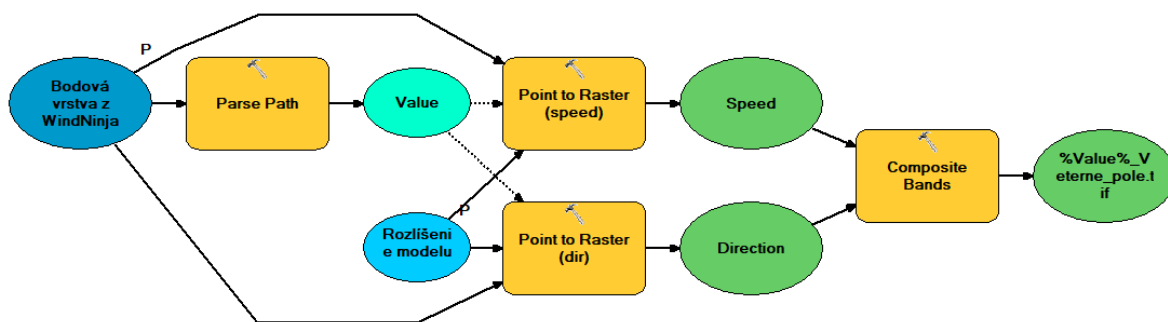
Následne prejde model do fáze, pri ktorej posunie body vetra podľa smeru prúdenia vetra o takú vzdialenosť, akú určíme pri vstupnom parametre *Dĺžka jedného opakovania modelu posunu snehu [m]*. Toto docielime pomocou modelu *Sub-model – Posun snehu* (pozri prílohu 3), na ktorého vstupe sa nachádza bodová vrstva snehu (už aj s hodnotami o odnesenom snehu), raster smeru vetra a vzdialenosti odnosu požadovaného odnosu snehu, ako aj s celkovou vzdialenosťou, ako aj samotného kroku. Celý tento model funguje v *For* cykle, ktorý sa opakuje dokiaľ jednotlivé kroky (opakovania odnosu snehu) nedosiahnu hodnotu celkovej požadovanej vzdialenosti odnosu snehu. Tieto vzdialenosti je potrebné nastaviť používateľom, vzhľadom na to, že model nedokáže zistiť, v akom rozlíšení je mriežka bodovej vrstvy. Je pritom potrebné dbať na to, aby táto vzdialenosť bola väčšia ako je rozlíšenie bodovej vrstvy, v opačnom prípade by sa body veterného poľa, s hodnotami odviateho snehu, v ďalšej fáze pripojili k pôvodným bodom, čoho výsledkom by bolo, že nedošlo k žiadnym zmenám. Počas každého opakovania dochádza k priradeniu hodnôt z rastra smeru vetru k bodovej vrstve a následne pomocou skriptu v *Pythone* k presunu bodov. Vstupným parametrom do daného skriptu je bodová vrstva vetra, ktorá v sebe, pre správnu funkčnosť skriptu, musí obsahovať informácie o polohe bodu, atribút vzdialenosti odnosu a smere odnosu, ktoré pomocou goniometrických funkcií presunie na nové miesto. Výsledkom bude pôvodná bodová vrstva, s hodnotami odviateho snehu  $Q_L$  a  $Q_U$  presunutá na nové miesto, podľa smeru vetra a udanej vzdialenosti.

V nasledovnej fáze model prevedie tieto body odviateho snehu do nových rastrov pomocou funkcie *Point to Raster* a zistí hodnotu *SWE* pre obe hodnoty  $Q_L$  a  $Q_U$  a rovnako aj zistí rozdiel, medzi pôvodnou hodnotou *SWE* a novou. Všetky tieto hodnoty zapíše aj do pôvodnej bodovej vrstvy vetru. Z nej sa v nasledovnom kroku, po orezaní funkciou *Clip*, vytvoria výsledné rastre pre novú hodnotu *SWE*, ako aj pre rozdiely, pre obe hodnoty  $Q_L$  a  $Q_U$  vo formáte .tif. Rovnako na výstupe bude aj pôvodná bodová vrstva, doplnená o tieto atribúty, pre prípadné ďalšie spracovanie. Celý tento model, pod názvom *Hlavný model (dáta o snehu z rastrov)* je možné vidieť v prílohe 1.

V prípade, pokiaľ používateľ nedisponuje rastrovými hodnotami fyzikálnych vlastností snehu, je umožnené ich zadanie aj formou čísla. V tomto prípade využije samostatný model *Hlavný model (dáta o snehu z čísla)* (pozri prílohu 3), ktorý ešte pred samotným procesom spustenia hlavného modelu, ktorý bol opisovaný vyššie, vytvorí konštantné rastre s hodnotami zadanými používateľom na území, ktoré sa zhoduje

s bodovou vrstvou veterného poľa. Tieto rastre následne model uloží do geodatabáze (kde zostanú uložené aj po skončení behu modelu, pre prípadné ďalšie využitie) a ďalej s nimi bude pracovať, ako s rastrovými vstupmi pre hlavný model.

V rámci *toolboxu Modelacia\_A-O\_sys.tbx*, v ktorom sa nachádza aj samotný hlavný model v oboch variantoch, sa rovnako nachádzajú aj tzv. „Sub-modely“, ktoré sú súčasťou hlavného modelu (napríklad *Sub—model – Príprava dát*, pozri prílohu 2), ako aj model *WindNinja to Raster* (pozri obrázok 6), ktorý slúži na vytvorenie dvojkanálového rastu z bodov WindNinja, obsahujúce rýchlosť a smer vetra. Tento model vytvára rastrovú vrstvu pre jednoduchšie prezeranie veterného poľa v prostredí ArcMap, keďže pri zobrazovaní pôvodnej bodovej vrstvy dochádza pri každom posune k vykresľovaniu bodov, ktoré môže byť rušivé pri prezeraní, keďže sa jedná často o tisíce jednotlivých bodov. Výsledný raster sa ukladá vo formáte .tif do priečinku *Veterne\_Polia*, v rámci priečinku Raster, s predponou názvu bodovej vrstvy, z ktorej bol vytvorený.



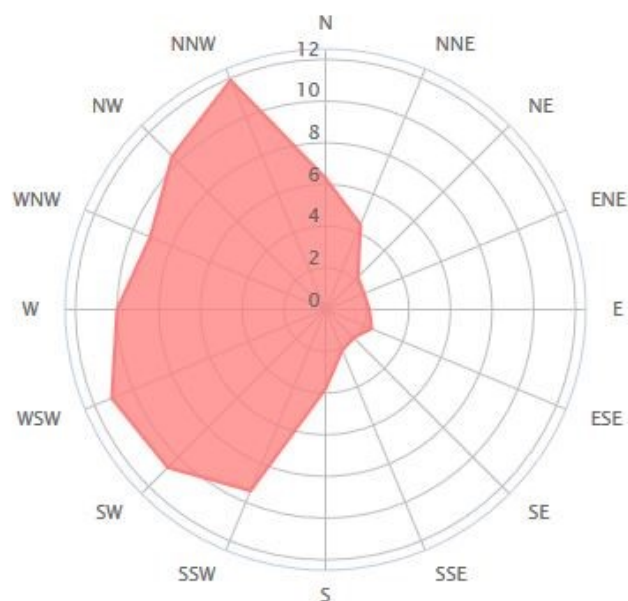
Obrázok 6: Nákres modelu WindNinja to Raster. Zdroj: vlastné spracovanie.

## 7 Testovanie modelu

Pre testovanie modelu boli vybraté dva výseky na území Krkonošského národného parku, na ktorom bude daný model demonštrovaný. V prvom prípade pôjde o výrez, o šírke 45 km a výške 20 km, pri ktorom je zachytená prevažná časť pohoria a územie, na ktorom sa vyskytujú anemo-orografické systémy opísané Jeníkom, pričom bude model pracovať s rozlíšením 50 metrov, aby bolo možné verifikovať, či dokáže model vieroходne určiť potencionálne miesta pre anemo-orografický systém. V druhom prípade ide o výrez územia v okolí Luční boudy s výškou a šírkou 2 km, so známym fenoménom Mapa Republiky, ktorý je výsledkom anemo-orografických systémov, pričom sa bude pracovať s najvyšším možným rozlíšením, ktoré dovoľuje hardvér. V prípade testovania modelu sa využívalo prostredie 64-bitového operačného systému *Windows 10 Pro* s procesorom *Intel® Core™ i5-4210H* o frekvencii 2,90 GHz s použitím operačnej pamäte o veľkosti 8 GB. V tomto prípade bolo limitujúce rozlíšenie výstupu zo softvéru *WindNinja 3.5.2.*, ktoré napokon určilo maximálne rozlíšenie na hodnote troch metrov.

Počas celého roka v oblasti Krkonoš dominuje prúdenie vetra zo západu (pozri obrázok 7) pri priemernej ročnej rýchlosti 20 uzlov (Windfinder 2019), čo predstavuje  $10,28 \text{ m s}^{-1}$ . Z tohto dôvodu bude pre simuláciu vetra a následného odnosu snehu vybrané dominantné smery vetra po  $45^\circ$ , a to  $0^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  a  $315^\circ$  pri rýchlosti  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Následne, pri finálnych dátach o odnose snehu tieto výsledky normalizujeme váženým priemerom (pozri tabuľku 3).

Wind direction distribution in %  
Year



© windfinder.com

Obrázok 7: Priemerný smer vetra na stanici Šniežka za rok v období september 2010 – marec 2019 [%].  
Zdroj: windfinder.com

Smer vetra [°]	0	45	90	135	180	225	270	315
Priemerný smer vetra za rok [%]	14,45	5,4	4,3	4,15	9,55	20,95	20,1	20,9
Normalizované údaje	0,1891					0,2742	0,2631	0,2736

Tabuľka 3: Priemerný smer vetra na stanici Šniežka za rok v období september 2010 – marec 2019 a normalizácia pre potreby získania priemernej hodnoty. Zdroj: windfinder.com, vlastné spracovanie

Pri samotnom modelovaní vetra v prostredí WindNinja sú nasledovné postupy zhodné, okrem rozlíšenia, ktoré má každý prípad osobité. Pre oba prípady je potrebné aplikovať veterné modely na dané územia v softvérovom prostredí *WindNinja-3.5.2*. Pri riešení sú využité obe varianty, ktoré daný softvér ponúka: model, ktorý zachováva hmotu (*Conservation of Mass*) a model, ktorý zachováva hmotu a hybnosť (*Conservation of Mass and Momentum*). Pri prvej možnosti do sekcie *Surface Input* je vložený súbor s digitálnym modelom reliéfu, do políčka *Vegetation* vložená hodnota *Grass* a rozlíšenie (*Mesh Resolution*) nastavené v poli *Custom* na požadovanú hodnotu. Do sekcie *Wind Input* je potrebné zadať informácie o vetre, ktoré predstavujú vietor o sile  $10 \text{ m s}^{-1}$  vo výške 10 m a požadovaný smer prúdenia vetra (0, 225, 270, alebo 315). V sekcii *Output* sú nastavené hodnoty pre výstup vetru v jednotkách  $\text{m s}^{-1}$  vo výške 10 metrov, ktorý je orezaný o 5%, aby boli eliminované nepresnosti, ktoré vznikajú na okraji simulovaného

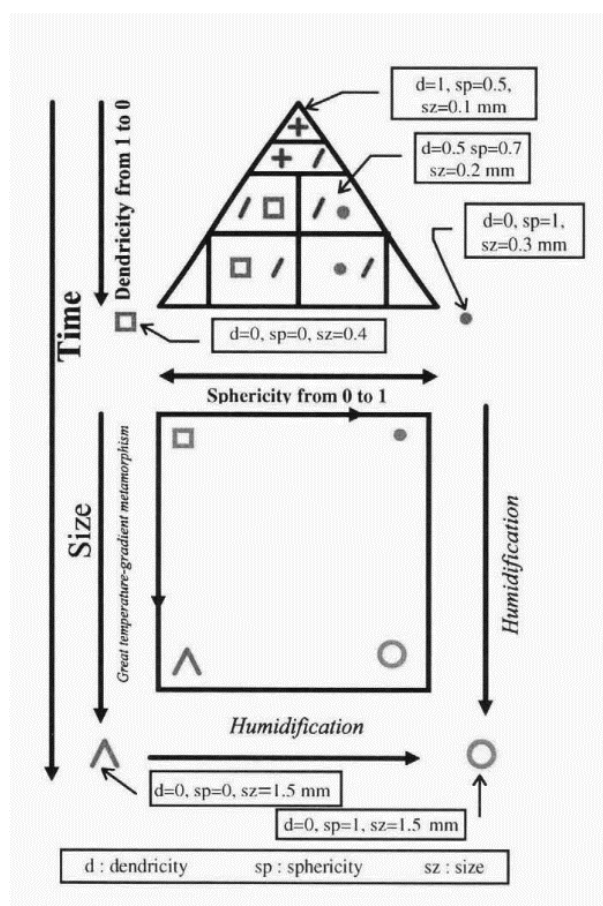
územia, ktoré sú požadované vo formáte .shp. Celý model sa spúšťa v sekcii *Solve* a výsledný súbor .shp sa ukladá do priečinku v ktorom sa nachádza raster. V prílohe 5 možno vidieť vzor zadaných hodnôt do softvéru *WindNinja-3.5.2*.

Pri využití možnosti *Conservation of Mass and Momentum* vo softvéri *WindNinja* je potrebné zmeniť nastavenie v sekcii *Surface Input*, kde pri rozlíšení (*Mesh Resolution*) je potrebné nastaviť hodnotu, ktorá bude ponúkať najvyššie rozlíšenie, a to hodnotu *Fine*. Taktiež pri výstupe, aby ostalo zachované celočíselné rozlíšenie pre neskoršiu prácu modelu odnosu snehu, je potrebné nastaviť v sekcii *Output – Shape Files* celočíselnú hodnotu požadovaného rozlíšenia.

Výsledné bodové vrstvy bodového veterného poľa pridáme v softvéri *ArcGIS* do geodatabázy *Modelacia\_A-O.gdb*, ktorá sa nachádza v priečinku spoločne s modelom. Následne bude vytvorený polygón záujmového územia. Keďže už máme body z veterného poľa orezané o okraje, ako záujmové územie určíme územie prevažnej väčšiny bodového poľa, s tým že necháme po okrajoch priestor o vzdialenosti dvojnásobnej rozlíšeniu modelu, ako nárazníkovú zónu pre potreby výpočtu z okrajových častí, pričom rohové body polygónu sa nachádzajú priamo na bodoch veterného poľa. Pre potreby testovania modelu, je potrebné zvoliť aj jednotné fyzikálne vlastnosti snehu, ktoré sú pre účel testovania konštantné a ktoré reprezentujú fyzikálne hodnoty pre čerstvý sneh, s maximálnou hodnotou dendricity, podľa vlastností uvedených na obrázku 8, spolu s vodnou hodnotou snehovej pokrývky 40 mm. Hodnoty posunu snehu sú zvolené tak, aby sa jednotlivé body, počas posúvania, dostali k vedľajšej bunke, aj s istou mierou tolerancie, rovnako, ako aby bol zachovaný aj smerový pomer pomocou podkladovej rastrovej vrstvy, pričom je potrebné sa vyvarovať tomu, aby sa vykonávalo príliš mnoho opakovaní odnosu snehu, preto ich je ich počet určený ako maximálne sedem (zadané hodnoty vzdialeností do modelu si je možné pozrieť v tabuľke 4).

Územie	Typ modelu	Rozlíšenie výstupu modelu WindNinja [m]	Vzdialenosť odnosu snehu [m]	Dĺžka jedného opakovania modelu posunu snehu [m]
Krkonoše	Mass and Momentum	100	140	20
Krkonoše	Mass	50	70	10
Mapa Republiky	Mass and Momentum	3	5	1
Mapa Republiky	Mass	3	5	1

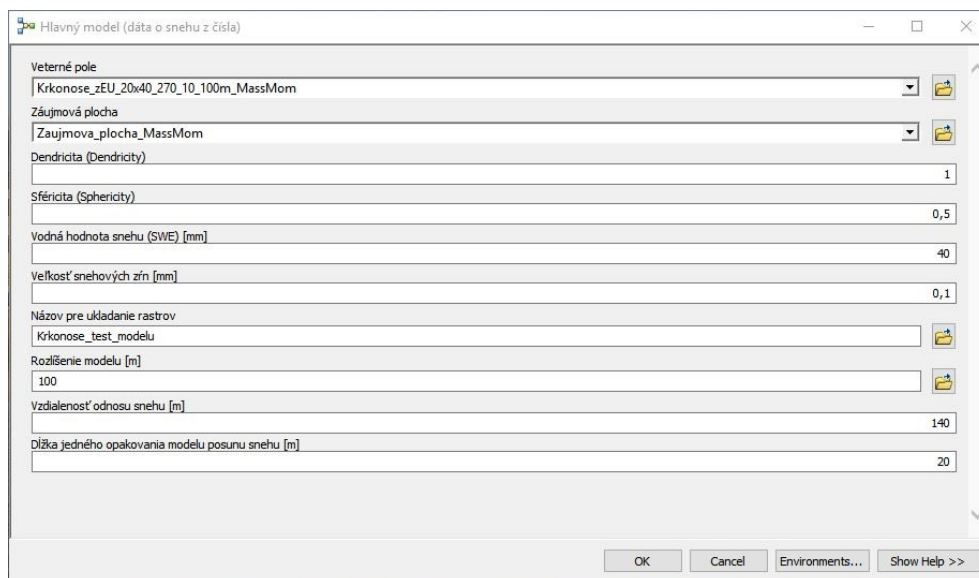
Tabuľka 4: Určené modelové hodnoty pre demonštráciu modelu. Zdroj: autor



Obrázok 8: Symbolizmus v modeli Crocus pre sneh v snehovej pokrývke ako funkcia viacerých kontinuálnych parametrov. Smerom od vrcholu obrázku k dolnej časti možno pozorovať zmenu z čerstvého, k premenenému snehu vzhľadom na čas, veľkosť snehového zrna, metamorfizmus snehu na základe teploty a zvlhčovaniu. Jednotlivé hodnoty predstavujú dendricitu ( $d$ ), sféricitu ( $s$ ) a veľkosť snehového zrna ( $sz$ ). Zdroj: Guyomarc'h, Mérindol 1998.

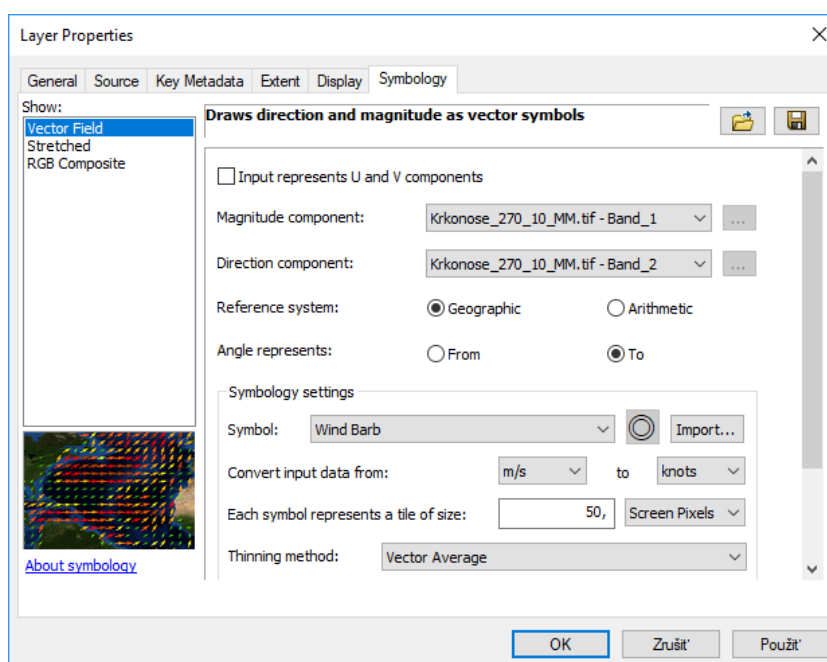
Pri prvej modelácii na každom území, pokiaľ nie sú dostupné rastre s fyzikálnymi hodnotami snehovej pokrývky, je potrebné pracovať s modelom *Hlavný model (dáta o snehu z čísla)*, ktorého výsledkom sú, okrem bežných výstupných údajov z modelu, aj rastre fyzikálnych vlastností snehu. Tieto rastre sú následne podkladovými rastrami o fyzikálnych vlastnostiach snehu, ktoré sa využívajú pri ďalších modelovaniach v modeli *Hlavný model (dáta o snehu z rastru)*. Fyzikálne hodnoty snehovej pokrývky, ktoré boli určené, vkladám do jednotlivých polí, obdobne ako aj importovanú bodovú vrstvu veterného poľa zo softvéru WindNinja, záujmovým územím, názvom rastru fyzikálnych hodnôt snehu, rozlíšením modelu a požadovanou vzdialenosťou odosu a aj jednotlivého kroku (pozri obrázok 9). Pri behoch modelu s ďalšími veternými poľami sa pre informácie o fyzikálnych vlastnostiach snehu využijú už vytvorené konštantné rastre, vzniknuté v prvom kroku.





Obrázok 9: Vložené hodnoty do modelu „Hlavný model (dátá o snehu z čísla)“ v prostredí ArcGIS na demonštračných testovacích dátach. Zdroj: autor.

Po skončení všetkých procesov sú dostupné výsledné rastre vo formáte .tif pre jednotlivé ukazovatele dostupné v priečinku spoločne s modelom. Z nich sú následne pomocou nástroja *Raster Calculator* vytvorené rastre váženého priemeru. V prípade, pokiaľ bude potrebné vizualizovať veterné pole podľa smeru a rýchlosti vetru, možno k tomu využiť nástroj *WindNinja To Raster*, ktorý vytvorí dvojkanálový raster, ktorý je možné v nastaveniach vrstvy jednoducho vizualizovať pomocou možnosti *Vector Field* (pozri príklad na obrázku 10).



Obrázok 10: Príklad nastavenia vizualizácie veterného poľa v prostredí ArcGIS na prípade dvojkanálového rastra, ktorý bol výstupom nástroja *WindNinja To Raster*. Zdroj: autor.

## 8 Výsledky

Hlavným výsledkom práce je model, ktorý slúži na simuláciu odnosu snehu v anemo-orografickom systéme. Daný model je súčasťou *toolboxu*, ktorý je priložený v CD prílohe tejto práce v priečinku *Model*. Model bol otestovaný na skúšobných dátach a dvoch rôznych digitálnych modeloch terénu, pri viacerých rozlíšeniach, počas ktorých sa podarilo tento model spustiť bez problémov.

Ďalším výsledkom tejto práce sú rastrové reprezentácie rozdielov vodnej hodnoty snehovej pokrývky pre vzťahy  $Q_U$  a  $Q_L$  na príklade Krkonoš (pozri prílohu na CD v priečinku *Výsledne rastre*), pri rozlíšení umožňujúce zachytiť celého pohoria (v rádoch desiatok metrov), a okolia známeho fenoménu Mapy republiky, pri zachytení malého výseku krajiny (s rozlíšením v rádoch metrov), pri použití priemerných hodnôt smeru a rýchlosti vetra.

### 8.1 Krkonoše

Výsledné mapy modelovaných rozdielov vo vodnej hodnote snehu, za použitia vzťahu  $Q_U$  možno vidieť, podľa použitých metód modelácie vetru, za územie Krkonoš v prílohe 6 (*Conservation of Mass*) a 7 (*Conservation of Mass and Momentum*). V ďalšom texte tejto kapitoly budú tieto prílohy zmieňované ako *CoM* a *CoMM*.

V prípade použitia veterného modelu *CoM* a následne vlastného modelu pre odnos snehu, je možné, pri sledovaní opísaných záveterných turbulentných priestorov anemo-orografických systémov, ich pozorovať ako miesta s vysokým prírastkom snehu. Je však nutné poznamenať, že okrem daných miest boli označené ako miesta s vysokým pozitívnym prírastkom vodnej hodnoty snehu identifikované takmer všetky ostatné záveterné hrebene.

V prípade použitia veterného modelu *CoMM* a následne vlastného modelu pre odnos snehu, možno vidieť, že nie všetky opisované záveterné turbulentné priestory obsahujú na svojom území pozitívne hodnoty prírastku vodnej hodnoty snehovej pokrývky, kde ako príklad možno poukázať na Labský důl, pri ktorom model nasimuloval akumulácie snehu vo väčšom rozsahu len pri jeho severnom okraji, avšak ešte na plošine, západne od jeho hrany, v južnej časti už model vykazuje len veľmi malé územia s akumuláciami snehu. Táto skutočnosť môže byť spôsobená faktom, že tento veterný model pracoval s horizontálnym rozlíšením 100 metrov, pričom jeho náprotivok

s rozlíšením 50 metrov. To mohlo spôsobiť, v prípade vyššie zmieneného Labského dolu, že veterný model nedokázal dostatočne určiť vetry v jeho okolí a že hrana karu bola vďaka rozlíšeniu posunutá viac smerom na západ. Podobne ako pri použití modeli *CoM* si je možné všimnúť, že v závetriach mnohých hrebeňov predpokladá model s miestami so zvýšenou akumuláciou snehu, avšak nie na toľkých územiach.

Je možné konštatovať, že ako presnejšie výsledky sa javia tie z modelu *CoM*, aj napriek tomu, že podľa predpokladov by mal horšie simulovať záveterné priestory. Je však možné, že tento prvok bol potlačený vďaka lepšiemu priestorovému rozlíšeniu pôvodne modelovaného vetru (50 metrov), oproti rozlíšeniu modelu *CoMM*, ktoré dosahovalo 100 metrov.

## 8.2 Mapa Republiky

Výsledné mapy modelovaných rozdielov vo vodnej hodnote snehu, za použitia vzťahu  $Q_U$  možno vidieť, podľa použitých metód modelácie vetru, za územie Krkonoš v prílohe 8 (*Conservation of Mass*) a 9 (*Conservation of Mass and Momentum*). V ďalšom texte tejto kapitoly budú tieto prílohy zmieňované ako *CoM* a *CoMM*, rovnako ako aj skratka *SWE* pre vodnú hodnotu snehu.

Je možné si všimnúť, že pri pohľade na modelované územie pri použití modelu *CoM* je vidieť mnohé snežné polia, ktoré model dostatočne zaznamenal, často aj tie menších rozmerov. Väčšie nepresnosti sú hlavne v miestach s väčším plošným rozsahom, alebo v miestach s nízkou vegetáciou. Toto je pravdepodobne spôsobené nastavením veterného modelu, ktorý nebral pri výpočtoch na týchto miestach do úvahy túto vegetáciu, keďže vegetačný kryt bol nastavený v režime *Grass*. Je možné si všimnúť, že na viacerých miestach nedosahuje namodelovaná snehová pokrývka východných okrajov snehových polí. Toto môže byť spôsobené tým, že simulácia prebiehala len za podmienok priemerného vetra. Vďaka tomu je možné, že odnos snehu nedosiahol na tieto okraje z toho dôvodu, že simulovaný vietor na to nebol dostatočne silný a sneh sa dostáva na dané miesta len pri vyšších rýchlostiach vetra.

V prípade použitia veterného modelu *CoMM* je možné si povšimnúť, že nedosahuje také podrobné rozlíšenie jednotlivých snehových polí, ako predošlý model, aj napriek tomu, že pracovali pri rovnakom horizontálnom rozlíšení 3 metre. Viditeľnou črtou, ktorú je vidieť na prvý pohľad, sú štruktúry mriežkovitého tvaru nachádzajúce sa v celom

územií. Za pravdepodobnú príčinu tohto javu považujem skutočnosť, že pri používaní modelu *CoMM* je možné v softvéri prostredí WindNinja pri horizontálnom rozlíšení zvoliť jedine z troch preddefinovaných možností, ktoré ponúka model. Avšak, tieto možnosti sú často neceločíselné, lenže pre beh modelu je potrebné používať celočíselného hodnoty. Preto na výstupe z tohto modelu som zaokrúhlil danú hodnotu na 3 metre, vďaka čomu je možné, že vďaka rôznym zaokrúhľovaniam pri prevode do tohto rozlíšenia pri dokončovaní behu modelu *CoMM* došlo k prvým chybám a následnými krokmi dochádzalo k ďalším nepredvídateľným akumuláciám chýb. Aj napriek tomuto efektu je možné pozorovať hrubé rysy miest, kde dochádza k akumuláciám. Tie je možné pozorovať hlavne v oblasti Mapy republiky, približne aj pozdĺž línie najväčšieho snehového poľa, na východnom svahu Luční hory a popri toku Bíleho Labe. Možno si je taktiež povšimnúť pomerne veľkú oblasť severne od snehového poľa Mapy republiky, na ktorom model určil pomerne významné miesto, kde dochádza k akumulácii snehu, avšak v skutočnosti na danom mieste neleží žiadna snehová pokrývka.

Pre ďalšie porovnanie bola na danom území vykonaná kvantifikácia výsledkov modelu (pozri prílohu 10), s použitím hodnôt, ktoré charakterizujú snehovú pokrývku rovnakými hodnotami rozdielu *SWE*, ako je možné pozorovať na mapách v prílohe 8 a 9. Základom kvantifikácie je, že v softvéri ArcGIS boli pomocou *Maximum Likelihood Classification* určené na leteckom snímku (Google Earth 2019) miesta so snehovou pokrývkou a bez nej. Tieto hodnoty boli následne porovnané s miestami, na ktorých bola podľa modelu pozitívna bilancia rozdielu *SWE*, poprípade táto hodnota bola nad určitú medzu (pričom táto hodnota je zhodná s legendou v prílohách 8 a 9). Najväčšiu mieru správnosti modelu za celé územie je možné pozorovať u výsledku modelu *CoM* pri určenej hodnote rozdielu *SWE*, pre vzťah  $Q_U, 0,005$  mm, kedy vykazuje model úspešnosť vyše 86 %, naopak najhoršiu detekciu dosiahol model *CoMM*, pri všetkých pozitívnych hodnotách rozdielu *SWE*, ktorý správne určil len 57 % územia. Všetky modely odnosu snehu vykazovali vysoké hodnoty nesprávne určených miest so snehovou pokrývkou (teda miest, na ktorých model predpokladal snehovú pokrývku, ale v skutočnosti sa tam nenachádzala), pričom väčšie hodnoty tohto parametru vykazoval model *CoMM*, a to 85 %, pre všetky miesta s pozitívnu bilanciu *SWE* a takmer 81 % v prípade určenej hodnoty rozdielu *SWE*, pre vzťah  $Q_U, 0,01$  mm. Najväčší podiel správne určeného územia so snehovou pokrývkou dosiahol model *CoM* pri použití všetkých pozitívnych hodnôt rozdielu *SWE*, kedy dokázal určiť takmer 72 % miest správne.

## 9 Diskusia

Na výsledkoch modelu sa prejavovalo viacero skutočností, ktoré ovplyvňovali presnosť jeho výstupov. Okrem typu použitého modelu, určeného pre modeláciu vetra bolo rozhodujúcim faktorom aj rozlíšenie modelovaného územia. To korešponduje so zisteniami štúdie, ktorá sledovala ukladania snehu s rôznymi rozlišovacími schopnosťami meteorologického modelu ARPS a následného ukladania a presunu snehu pomocou modelu Alpine3D, na príklade horského hrebeňa Gaudergrat vo švajčiarskych Alpách (Mott, Lehning 2010). Pri tomto výskume pracovali so sieťou s priestorovým rozlíšením 50, 25, 10 a 5 metrov, pričom zisťovali, ktoré rozlíšenie je ešte dostatočné na zachytenie objektov o menšej mierke a ktoré vernejšie reprezentujú terénne pozorovania. Jeho výsledkom bolo, že najrealistickejšie modelovanie bolo dosiahnuté pri modeli s horizontálnym rozlíšením 5 metrov.

V prípadných ďalších testovaní, by mohol byť otestovaný vplyv na správanie modelu odnosu snehu, aj pomocou ďalších možnosti veterných modelov vo WindNinja, akými sú efekty horského vetra a stability zvrstvenia atmosféry. Avšak pre vierohodnú modeláciu by bolo potrebné presnejšie meteorologické dáta, keďže na simuláciu týchto prvkov je potrebné dodať informácie nielen o smere a rýchlosti vetra, ale aj o čase, dátume, oblačnosti a teplote (RMRS Missoula Fire Sciences Laboratory 2018b).

Podstatnou nevýhodou vstupných dát o vetre bolo, že pri ich simulácii mohla byť použitá len jediná hodnota pre vegetáciu. Toto mohlo spôsobiť potencionálne odchýlky v modelovanej oblasti na miestach, kde sa nenachádzal vybraný typ vegetačnej pokrývky určený v parametroch modelácie vetru. Rozdiely v priemerných rýchlostiach vetra medzi miestami s lesným porastom a bez neho dosahuje, podľa prípadovej štúdie z Fínska (Vajda et al. 2006), len  $0,4 \text{ m s}^{-1}$ , avšak pravdepodobnosť vetra nad  $8 \text{ a } 10 \text{ m s}^{-1}$  je takmer dvojnásobne vyššia na miestach bez lesného porastu, ako na miestach kde sa nachádza.

Ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje presnosť modelu je ten, že model počíta, pri modelácii hodnoty odnesenej vodnej hodnoty snehu, len so vzťahom, ktorý bol odvodený z terénnych meraní hodnôt prúdiaceho snehu. Tento vzťah nedokáže určiť množstvo sublimovaného snehu počas transportu. V prípade 43 hodinovej simulácii snehovej pokrývky bol rozdiel medzi modelom, ktorý bral v úvahu sublimáciu transportovaného snehu a tým ktorý nebral na niektorých miestach až do 21 centimetrov, pričom za celé modelované územie bol rozdiel v objeme snehu 3 % (Zwaafink, Lehning 2009).

Ďalšie možnosti, ktoré by bolo vhodné posúdiť pri budúcom testovaní vierohodnosť modelu by mohlo byť testovanie s reálnymi meteorologickými dátami z viacerých staníc na testovanom území. Toto by docielilo presnejšiu simuláciu veterného poľa, ktoré by mohlo zlepšiť ukazovatele správnosti modelácie.

Pre prípadný budúci rozvoj modelu by bolo možné zakomponovať aj model pre odnos iných častíc, napríklad častíc pôdy, organickej hmoty a ďalšie súčasti, ktoré prispievajú k jedinečnosti anemo-orografických systémov. Toho je možné doceliť taktiež v prostredí ArcGIS, kde bol vyvinutý model pre možnosť simulácie ukladania suchých častíc, ktorý slúži na modeláciu ukladania sedimentov v jazere prenášaných vetrom (Brooks 2012).

## 10 Záver

Celkovo možno hodnotiť prácu modelu, ktorého vytvorenie bolo cieľom tejto práce, ako vhodnú pre modelovanie odnosu snehu pomocou vetra a zisťovanie akumulácii snehovej pokrývky, ktoré môžu byť príznakom prítomnosti anemo-orografického systému. Jedná sa pritom len o pomôcku, ktorá potencionálne uľahčí pátranie po anemo-orografických systémoch, vďaka tomu, že výstup z modelu, pri správne nastavených parametroch, môže ukazovať na záveterné turbulentné priestory v rámci daných systémov. Je nutné pritom prihliadať na fakt, že okrem správne určených miest, sa vo výsledných miestach objavuje aj mnoho potencionálnych miest, ktoré nie sú súčasťou anemo-orografických systémov. Preto je ešte potrebné, aby nad výstupmi z modelu odborník zhodnotil, či tieto miesta priliehajú k anemo-orografickým systémom, podľa ich ďalších vlastností, alebo nie. Medzi tieto vlastnosti možno zaradiť prítomnosť vodiaceho údolia, zrýchľujúcej časti, alebo aj druhotné znaky anemo-orografických systémov, ako napríklad botanicky bohaté lokality, alebo kary.

Počas testovania modelu bolo odhalené, že vo výslednej presnosti práce modelu sa odzrkadlí kvalita vstupných dát, medzi ktoré patrí predovšetkým priestorové rozlíšenie. Platí pri tom, že čím vyššie rozlíšenie vstupných dát do modelu, tým presnejšie sú výstupy z neho. Pri testovaní bolo taktiež zistené, že aj v prípade, že vstupné dáta nie sú vhodne pripravené (ako v prípade modelácie za územie „Mapy republiky“ za použitia veterného modelu *Conservation of Mass and Momentum*), stále je možné, aj keď s istou dávkou nepresnosti, nájsť pomocou tohto modelu miesta, kde dochádza k akumulácii snehovej pokrývky. Ďalej bolo počas procesu testovania zistené, že pre vierohodnú simuláciu postačuje aj, na dnešnú dobu, jednoduchší spôsob numerickej modelácie vetra, využívajúci princípu zachovania hmoty, ktorý dokonca vykazoval ako pri vizuálnom porovnaní, tak aj kvantitatívne lepšie výsledky ako model vyššej generácie (*Conservation of Mass and Momentum* v softvéri WindNinja využívajúci CFD).

Je nutné poznamenať, že model je možné využiť, aj napriek jeho primárnemu zameraniu k modelácii akumulácii snehovej pokrývky v rámci anemo-orografických systémov, aj pre ďalšie disciplíny, kde je potrebné zisťovanie akumulácii snehu, ako napríklad predpovede snehovej pokrývky, alebo modelácie lavín.

Príspevok tejto práce k rozšíreniu povedomia o teórii anemo-orografických systémoch sa ukáže až časom, preto tento cieľ bude možné hodnotiť až s jeho odstupom.

## 11 Použitá literatura

- BLAŽKOVÁ, D. (1983): Vegetation of the Vitoša Mountains (Bulgaria) in relation to an anemo-orographic system. *Preslia*, 57, 219–226.
- BROOKS, A. N. (2012): Modeling the Impact of Terrain on Wind Speed and Dry Particle Deposition Using WindNinja and ArcGIS Spatial Analyst. University of Redlands.
- CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES MÉTÉOROLOGIQUES (2014): Crocus - Introduction, <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article265&lang=en> (4. 5. 2019).
- COPERNICUS PROGRAMME (2016): EU-DEM v1.1, <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=metadata> (9. 5. 2018).
- DTU WIND ENERGY (2019): Wind resources for wind turbine production - WASP, <http://www.wasp.dk/wasp> (4. 5. 2019).
- ESRI (2019a): A quick tour of using iterators, <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/analyze/modelbuilder/a-quick-tour-of-using-iterators-for-iteration-looping-.htm> (4. 5. 2019).
- ESRI (2019b): What is ModelBuilder?, <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm> (4. 5. 2019).
- GASCOIN, S., LHERMITTE, S., KINNARD, C., BORTELS, K., LISTON, G. E. (2013): Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. *Advances in Water Resources*, 55, 25–39.
- GAUER, P. (2001): Numerical modeling of blowing and drifting snow in Alpine terrain. *Journal of Glaciology*, 156, 47, 97–110.
- GOOGLE EARTH (2019): Snímka oblasti Krkonoš z 19.5.2017, <https://www.google.com/earth/> (30. 4. 2019).
- GUYOMARC'H, G., MÉRINDOL, L. (1998): Validation of an application for forecasting blowing snow. *Annals of Glaciology*, 26, 138–143.
- GUYOMARC'H, G., MÉRINDOL, L., CASTELLE, T., SIVARDIERE, F., BUISSON, L. (1994): Blowing snow and avalanches. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 1994*, Snowbird, Utah, 211–221.
- HE, S., OHARA, N. (2017): A New Formula for Estimating the Threshold Wind Speed for Snow Movement. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7, 9, 2514–2525.
- HLAVÁČEK, R., SOFRON, J. (2007): Anemo-orografický systém a vliv požárů na vegetaci v Brdech. *Bohemia centralis*, 28, 321–352.
- JACKSON, P. S., HUNT, J. C. R. (1975): Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 430, 101, 929–955.
- JENÍK, J. (1961): Alpínská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku: teorie anemo-orografických systémů. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.



- JENÍK, J. (1998): Biodiversity of the Hercynian Mountains of Central Europe. *Pirineos*, c, 151–152, 83–99.
- JENÍK, J. (2008): Anemo-orografické systémy v evropských pohoří. *Geografické rozhledy*, 2, 18, 4–7.
- LI, L., POMEROY, J. W. (1997): Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data. *Journal of Applied Meteorology*, 3, 36, 205–213.
- LYSÁK, J. (2013): Dokumentace k digitálnímu modelu reliéfu a digitálnímu modelu povrchu z oblasti Krkonoš. Univerzita Karlova v Praze, Praha.
- MEISTER, R. (1989): Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity. *Annals of Glaciology*, 13, 195–201.
- METEODYN (2019a): RT Wind map software - Wind conditions monitoring, <https://meteodyn.com/en/logiciels/wind-alert-real-time-monitor-software-rtwindmap/#.XM79E6TLiHt> (4. 5. 2019).
- METEODYN (2019b): TopoWind software - Wind computation in complex terrain, <https://meteodyn.com/en/logiciels/cfd-wind-characteristics-assessment-software-topowind/#.XM79jqTLiHt> (4. 5. 2019).
- METEODYN (2019c): UrbaWind: wind comfort - Natural air ventilation - Urban wind energy, <https://meteodyn.com/en/logiciels/cfd-wind-pedestrian-comfort-safety-urbawind-software/#.XM740qTLiHs> (4. 5. 2019).
- MICHÁLEK, P., ZACHO, D. (2016): Wind tunnel studies of gas dispersion over complex terrain. *EPJ Web of Conferences*, November, 114, 02075.
- MOTT, R., LEHNING, M. (2010): Meteorological Modeling of Very High-Resolution Wind Fields and Snow Deposition for Mountains. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 11, 934–949.
- NYSERDA (2010): Wind Resource Assessment Handbook. Final Report 10-30. Albany, New York.
- POMEROY, J. W., GRAY, D. M. (1990): Saltation of snow. *Water Resources Research*, 7, 26, 1583–1594.
- POMEROY, J. W., MALE, D. H. (1987): Wind Transport of Seasonal Snowcovers. In: *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*. Springer Netherlands, Dordrecht, 119–140.
- POMEROY, J. W., MALE, D. H. (1992): Steady-state suspension of snow. *Journal of Hydrology*, 1–4, 136, 275–301.
- RAPP, B. E. (2017): Computational Fluid Dynamics. In: *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. Elsevier, 609–622.
- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2018a): WindNinja Tutorial 1: The Basics, [https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja\\_tutorial1.pdf](https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja_tutorial1.pdf) (3. 5. 2019).
- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2018b): WindNinja Tutorial 2: Diurnal Winds and Non-neutral Stability, [https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja\\_tutorial2.pdf](https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja_tutorial2.pdf) (3. 5. 2019).

- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2018c): WindNinja Tutorial 3: Point Initialization, [https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja\\_tutorial3.pdf](https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja_tutorial3.pdf) (3. 5. 2019).
- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2018d): WindNinja Tutorial 4: Weather Model Initialization, [https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja\\_tutorial4.pdf](https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/WindNinja_tutorial4.pdf) (3. 5. 2019).
- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2019a): About WindNinja, <https://weather.firelab.org/windninja/about.html> (3. 5. 2019).
- RMRS MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY (2019b): Who Uses WindNinja?, [https://weather.firelab.org/windninja/howdoes/who\\_uses.html](https://weather.firelab.org/windninja/howdoes/who_uses.html) (3. 5. 2019).
- SCHWEIZER, J., JAMIESON, J. B., SCHNEEBELI, M. (2003): Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 4, 41.
- STURM, M., STUEFER, S. (2013): Wind-blown flux rates derived from drifts at arctic snow fences. *Journal of Glaciology*, 213, 59, 21–34.
- VAJDA, A., VENÄLÄINEN, A., HÄNNINEN, P., SUTINEN, R. (2006): Effect of vegetation on snow cover at the northern timberline: A case study in Finnish Lapland. *Silva Fennica*, 2, 40, 195–207.
- WANG, Z., HUANG, N. (2017): The effect of mountain wind on the falling snow deposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1, 822.
- WINDFINDER (2019): Wind & weather statistics Śnieżka - Windfinder, <https://www.windfinder.com/windstatistics/sniezka> (20. 4. 2019).
- WINDSIM (2019): WindSim :: About, <http://windsim.com/about.aspx> (4. 5. 2019).
- WINSTRAL, A., ELDER, K., DAVIS, R. E. (2002): Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 3, 524–538.
- WSL INSTITUTE FOR SNOW AND AVALANCHE RESEARCH SLF (2019): SNOWPACK - SLF, <https://www.slf.ch/en/services-and-products/snowpack.html> (4. 5. 2019).
- ZEPHYR NORTH LTD. (2019): Our Products, <https://zephyrnorth.com/our-products/> (4. 5. 2019).
- ZWAAFTINK, C. D. G., LEHNING, M. (2009): Sublimation of Drifting Snow in an Alpine Catchment. 2008.

## 11.1 Použitý softvér

ArcMap 10.4.

WindNinja-3.5.2.

## 12 Zoznam príloh

CD príloha:

- *ArcGIS Toolbox* s modelom (umiestnený v priečinku *Model*)
- Výsledné rastre rozdielu vodnej hodnoty snehu pre hodnoty  $Q_U$  a  $Q_L$  (umiestnené v priečniku *Vysledne rastre*)

Príloha 1: Nákres modelu *Hlavný model (dáta o snehu z rastru)*

Príloha 2: Nákres modelu *Sub-model – Príprava dát*

Príloha 3: Nákres modelu *Hlavný model (dáta o snehu z čísla)*

Príloha 4: Nákres modelu *Sub-model – Posun snehu*

Príloha 5: Vzor zadania údajov do softvéru WindNinja

Príloha 6: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass* za Krkonoše

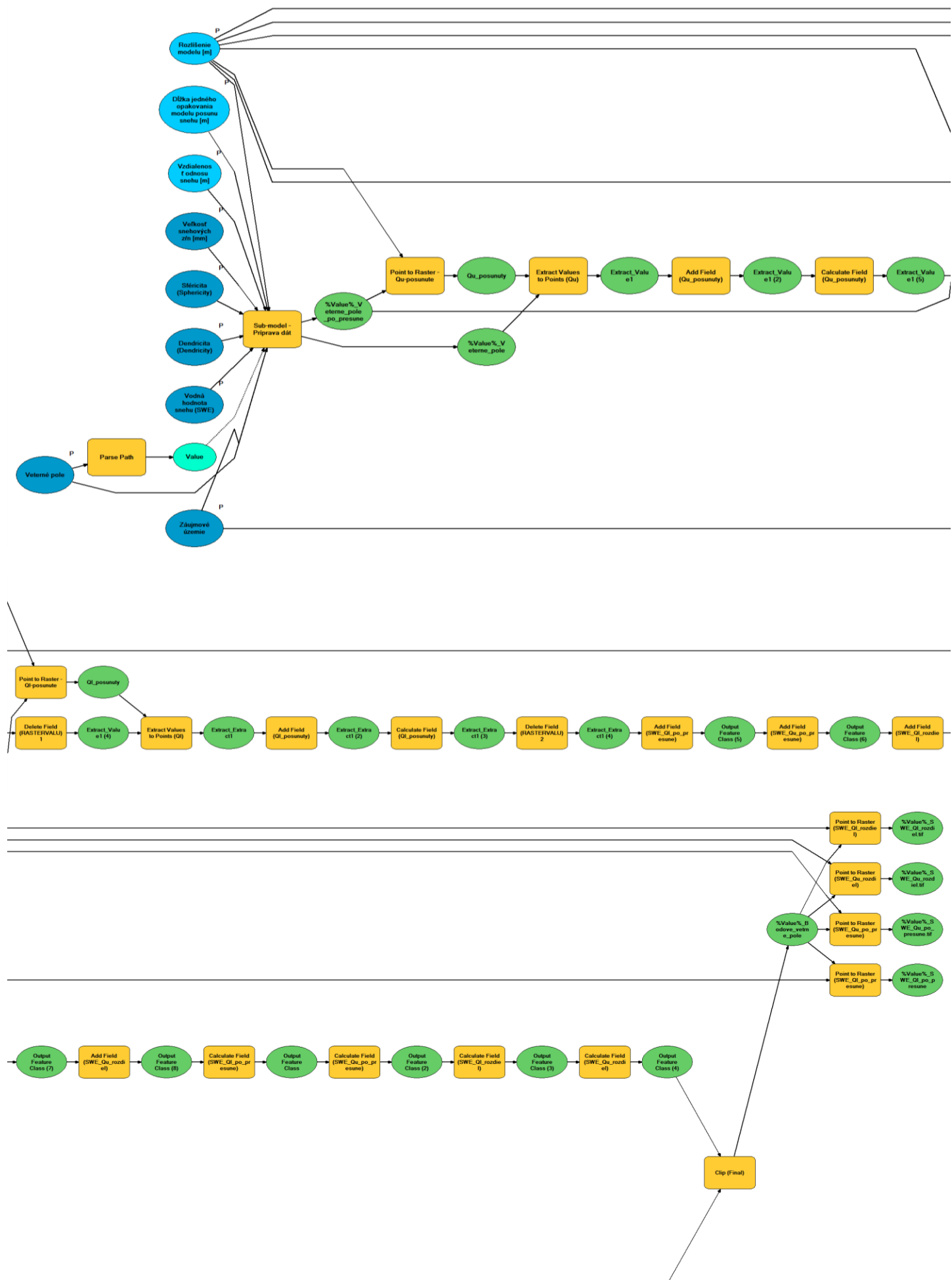
Príloha 7: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass and Momentum* za Krkonoše

Príloha 8: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass* za okolie Luční Boudy a Mapy Republiky v Krkonošiach

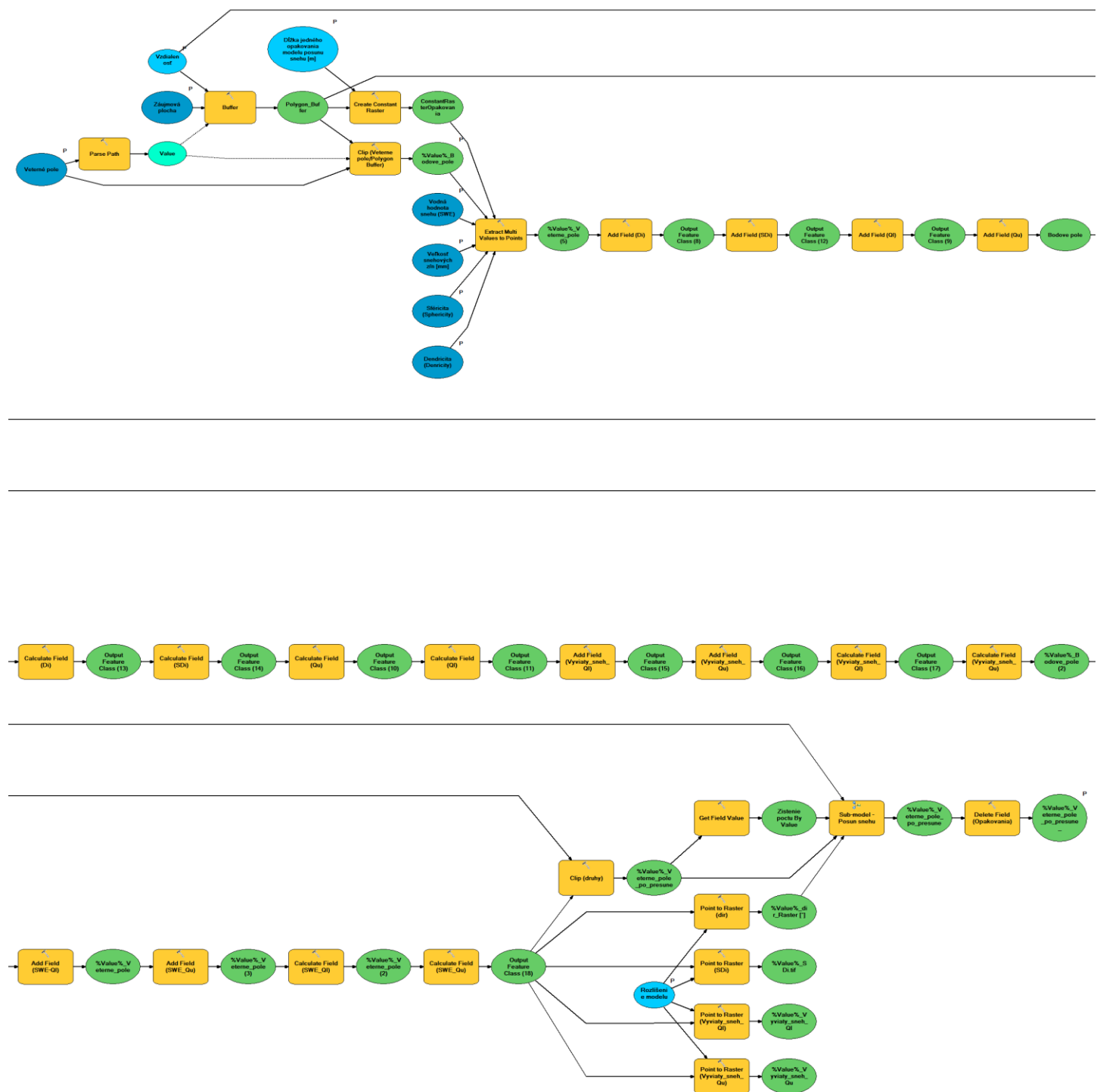
Príloha 9: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass and Momentum* za okolie Luční Boudy a Mapy Republiky v Krkonošiach

Príloha 10: Tabuľka s výsledkami analýzy správnosti detekcie snehovej pokrývky

## Príloha 1: Nákres modelu *Hlavný model (dáta o snehu z rastru)*



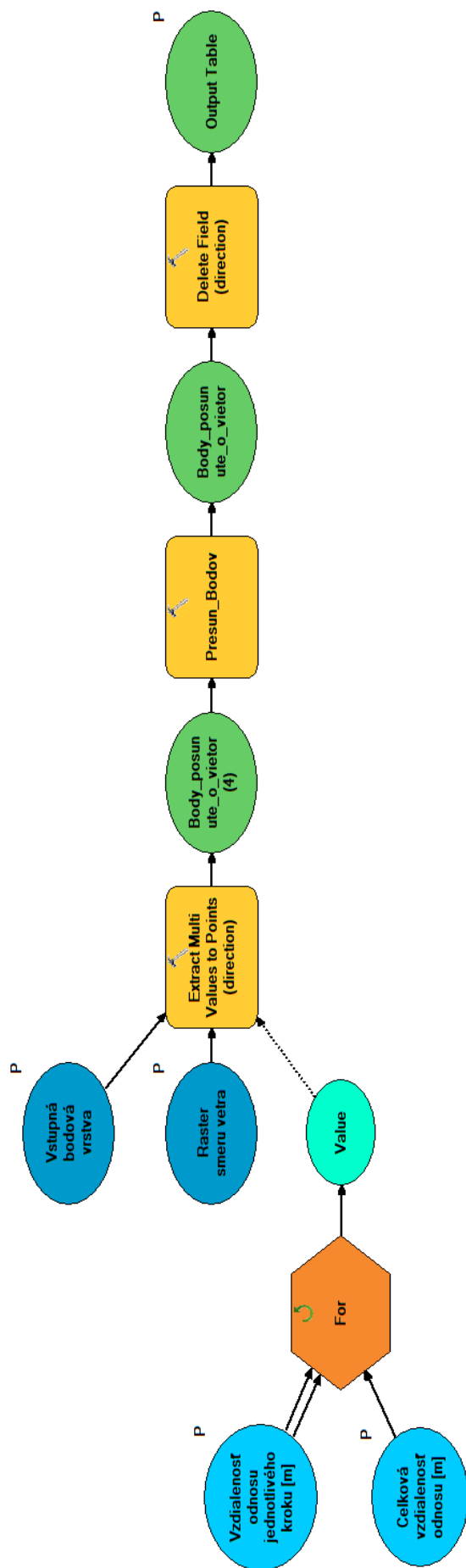
## Príloha 2: Náskres modelu *Sub-model – Príprava dát*



Príloha 3: Nákres modelu *Hlavný model (dáta o snehu z čísla)*



#### Príloha 4: Nákres modelu *Sub-model – Posun snehu*



## Príloha 5: Vzor zadania údajov do softvéru WindNinja

The figure displays four screenshots of the WindNinja software interface, arranged in a 2x2 grid, illustrating the configuration process for a simulation.

**Top Left Screenshot:** The 'WindNinja' window shows the 'Input' section selected in the left sidebar. The 'Surface Input' option is checked. The 'Elevation Input File' is set to 'MapaRepubliky2000.tif'. The 'Vegetation' is set to 'Grass'. The 'Mesh Resolution' is set to 'Custom' with a value of '3,00' and 'Meters' selected. The 'Time Zone' is set to 'Europe/Prague' and 'Show All Zones' is checked.

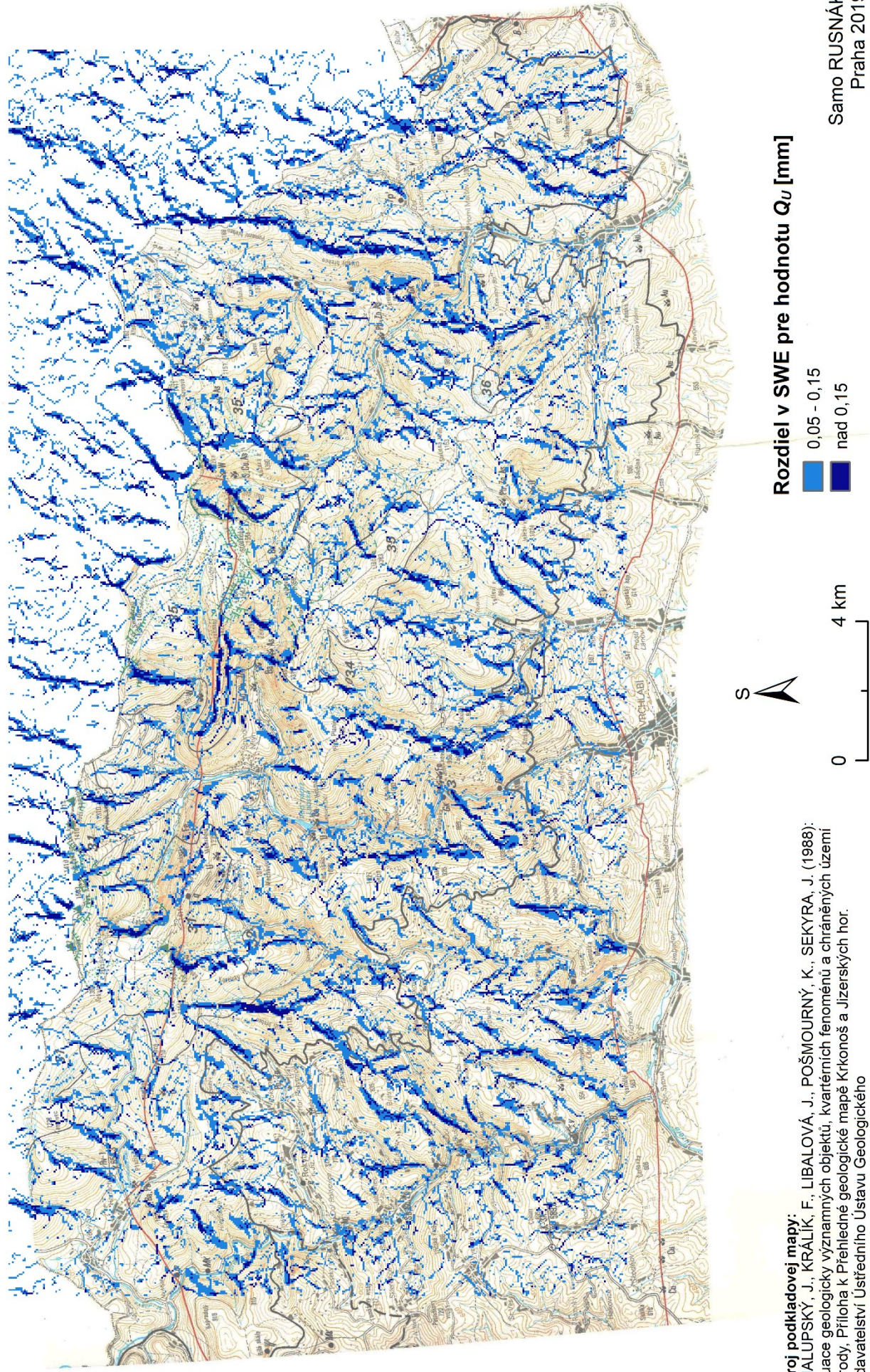
**Top Right Screenshot:** The 'WindNinja' window shows the 'Wind Input' section selected. The 'Domain Average Wind' checkbox is checked. The 'Input Wind Height' is set to '10m-SI' with a value of '10,00' and 'Meters' selected. A 'Clear' button is visible. Below this is a table with columns: Speed, Direction, Time, Date, Cloud Cover(%), and Air Temp. The table contains 10 rows of data, all showing 0 for Speed, Direction, Cloud Cover, and Air Temp, and 09:16 for Time, and 26. 4. 2019 for Date.

**Bottom Left Screenshot:** The 'WindNinja' window shows the 'Output' section selected. The 'Output Height' is set to '10m-SI' with a value of '10,00' and 'Meters' selected. The 'Output Speed Units' are set to 'm/s'. The 'Clip output by' is set to '5%'. The 'Write Raw Weather Model Output' checkbox is checked.

**Bottom Right Screenshot:** The 'WindNinja' window shows the 'Output' section selected. The 'Create Shape Files (\*.shp)' checkbox is checked. The 'Resolution' is set to '3,00' and 'Meters' selected. The 'Use Mesh Resolution' checkbox is checked.



## Príloha 6: Rozdiel v SWE pre hodnotu $Q_U$ pre veterný model Conservation of Mass za Krkonoše

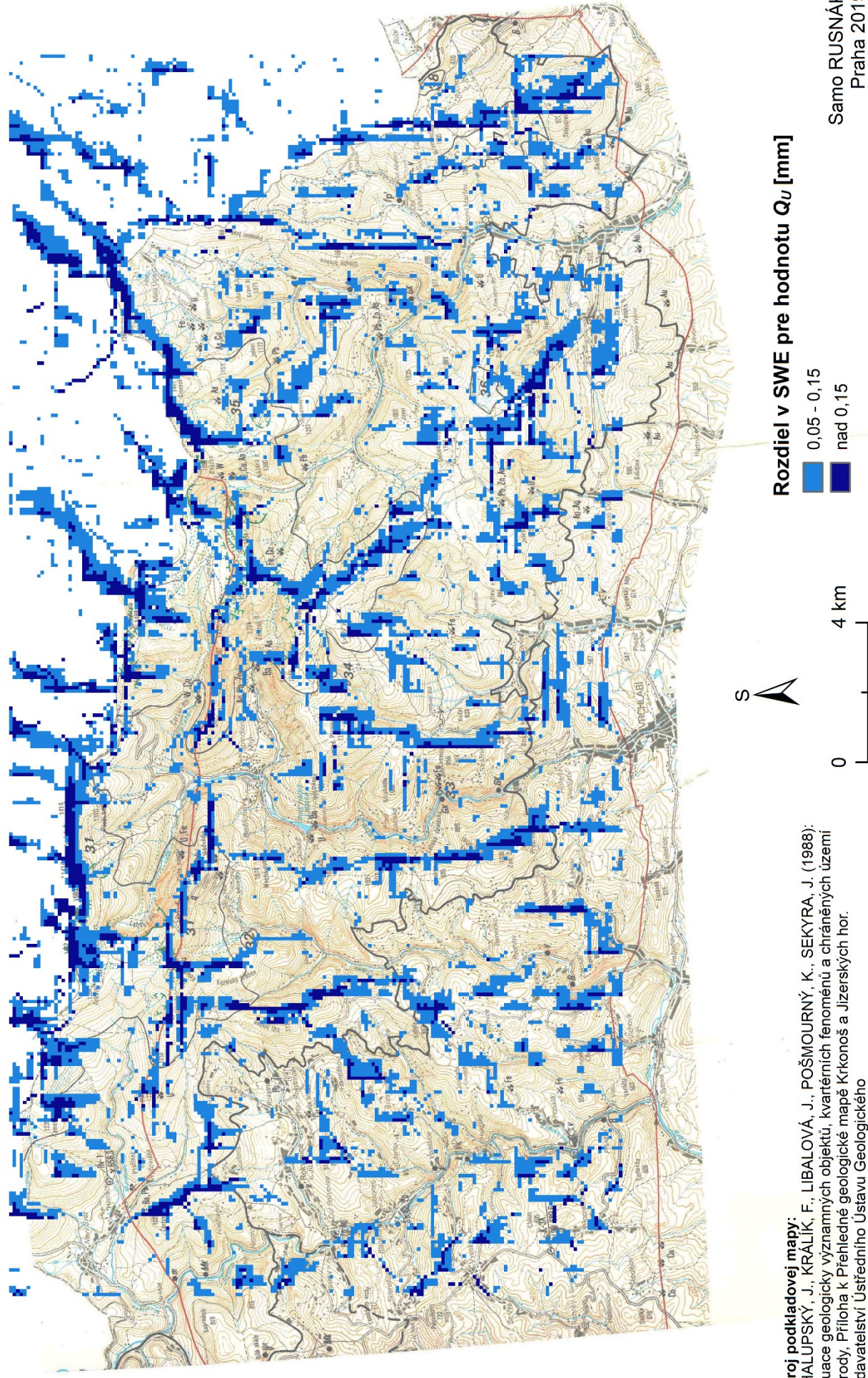


Zdroj podkladovej mapy:  
 CHALUPSKÝ, J., KRÁLÍK, F., LIBALOVÁ, J., POŠMOURNÝ, K., SEKYRA, J. (1988):  
 Situace geologicky významných objektů, kvartérních fenoménů a chráněných území  
 přírody, Příloha k Přehledné geologické mapě Krkonoš a Jizerských hor.  
 Vydavatelství Ústředního Ústavu Geologického

Samo RUSNÁK  
 Praha 2019

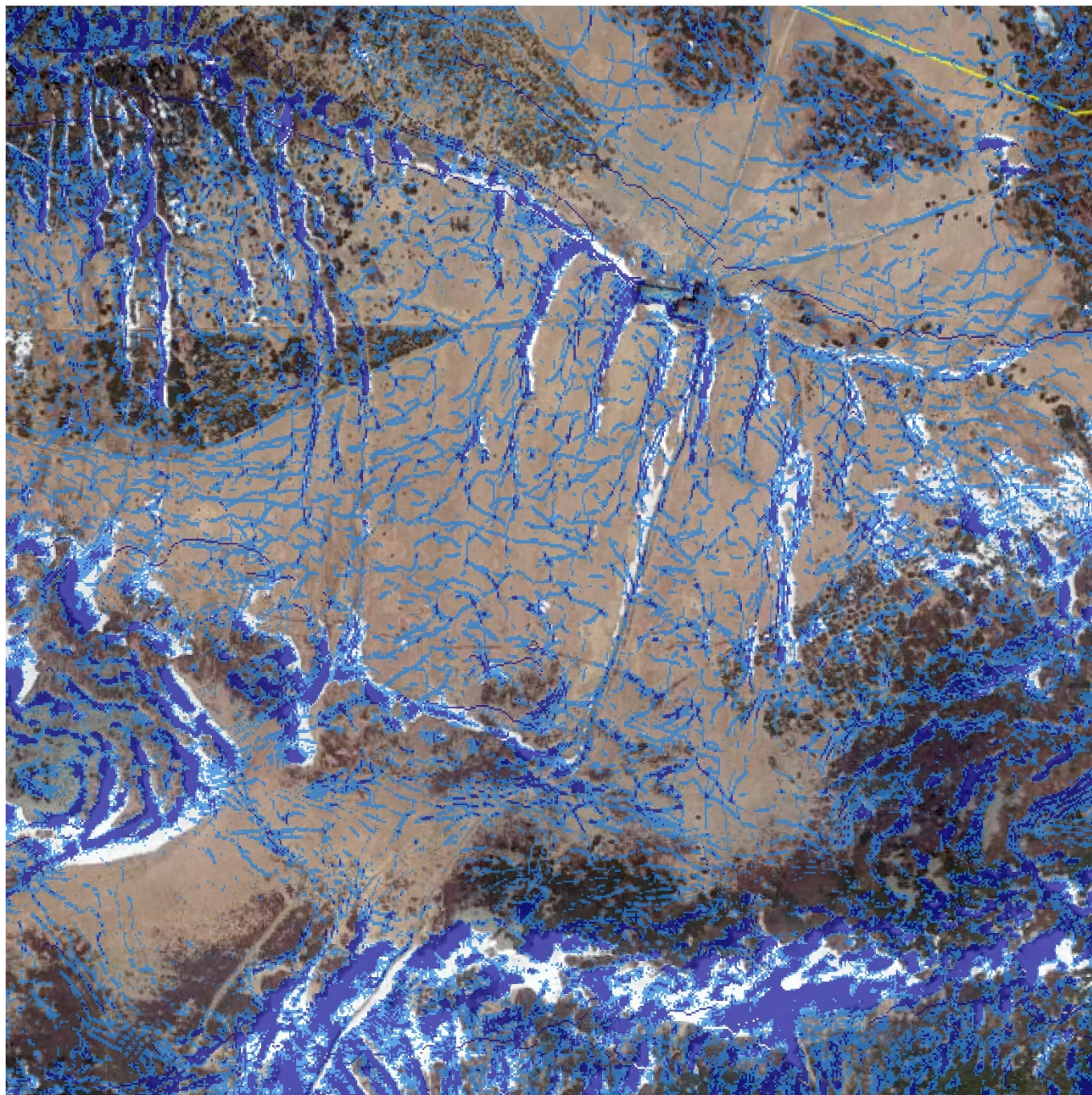


**Príloha 7: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model Conservation of Mass and Momentum za Krkonoše**





**Príloha 8: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass* za okolie Luční Boudy a Mapy Republiky v Krkonošiach**



0 600 m

**Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  [mm]**

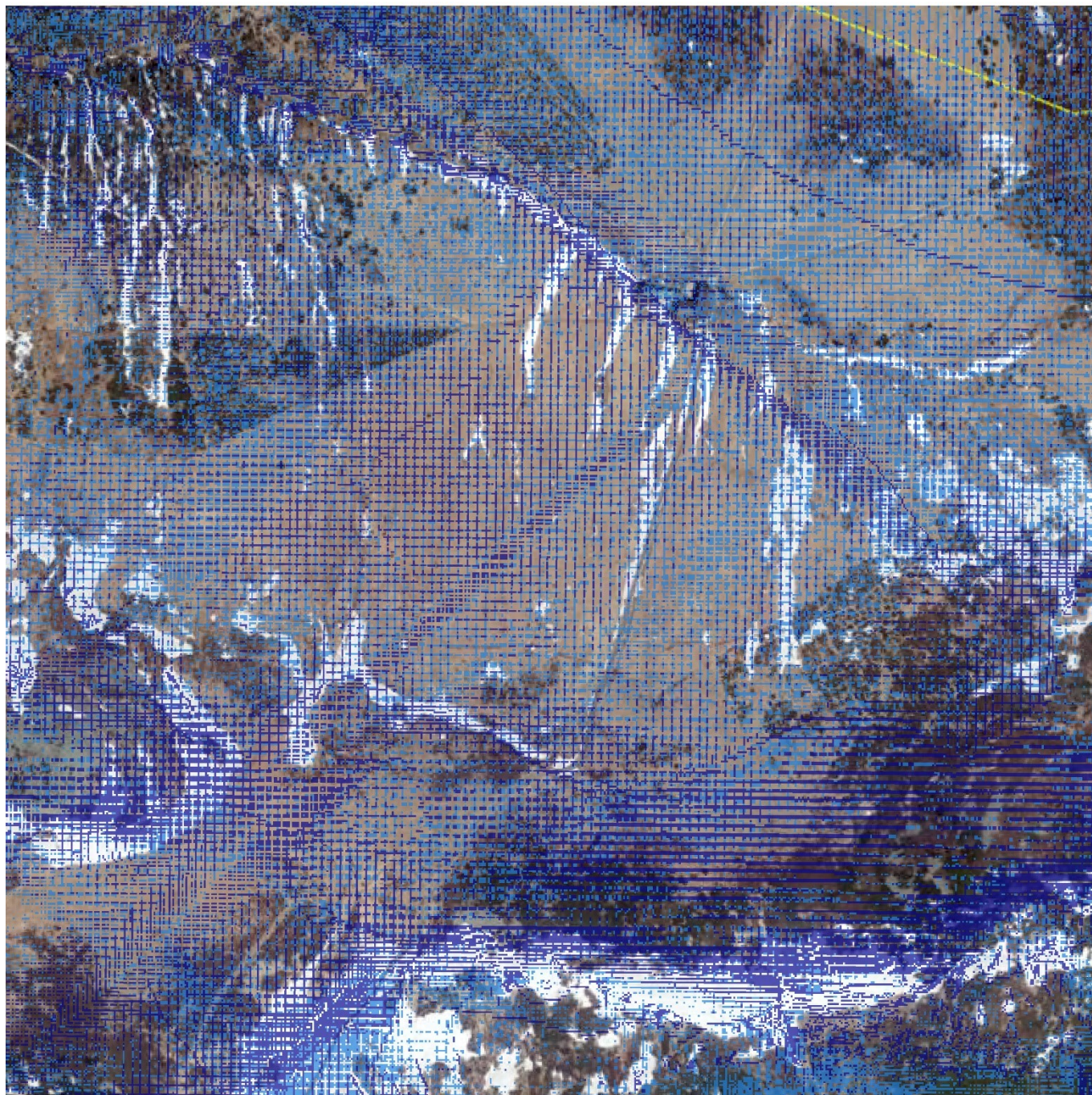
0 - 0,005  
nad 0,005

**Zdroj podkladovej snímky:**  
GOOGLE EARTH, (2019): Snímka oblasti Krkonoš  
z 19.5.2017, <https://www.google.com/earth/>  
(30.4.2019).

Samo RUSNÁK  
Praha 2019



**Príloha 9: Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  pre veterný model *Conservation of Mass and Momentum* za okolie Luční Boudy a Mapy Republiky v Krkonošiach**



0 600 m

**Rozdiel v SWE pre hodnotu  $Q_U$  [mm]**

0 - 0,01  
nad 0,01

**Zdroj podkladovej snímky:**  
GOOGLE EARTH, (2019): Snímka oblasti Krkonoš  
z 19.5.2017, <https://www.google.com/earth/>  
(30.4.2019).

Samo RUSNÁK  
Praha 2019

Príloha 10: Tabuľka s výsledkami analýzy správnosti detekcie snehovej pokrývky

		Plodha, podľa porovnania hodnôt zo snímku (vrchná bunka) a z modelu (spodná bunka) [%]							Zdroj: Google Earth 2019, vlastné spracovanie	
			Sneh	Bez snehu	Sneh	Bez snehu	Sneh	Bez snehu		
Typ veterného modelu	Hodnoty rozdielu SWE, pre vzťah $Q_{UV}$ , poukazujúce na snehovú pokrývku	Sneh	Sneh	Bez snehu	Bez snehu	Sneh	Sneh	Sneh	Modelom správne určené miesta so snehovou pokrývkou z celkovej plochy snehovej pokrývky [%]	Modelom nesprávne určené miesta so snehovou pokrývkou z celkovej modelovanej plochy snehovej pokrývky [%]
Conservation of Mass	viac ako 0,005	5,13		81,24	7,27	6,37		86,36	41,37	55,38
Conservation of Mass	viac ako 0	8,92		60,07	3,47	27,53		68,99	71,99	75,52
Conservation of Mass and Momentum	viac ako 0,01	3,74		72,04	8,66	15,56		75,78	30,14	80,63
Conservation of Mass and Momentum	viac ako 0	6,31		51,04	6,09	36,56		57,35	50,88	85,28